

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS



**EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE ARCILLAS
NATURALES EXISTENTES EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE
BERLÍN, USULUTÁN Y ELABORACIÓN DEL DIAGNÓSTICO
DE SU COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DURANTE LA
PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS.**

PRESENTADO POR:

BERTHA ARACELY ARENIVAR MARROQUÍN

GRISELDA CARLENI MARTÍNEZ PÉREZ

LAURA IVANIA RIVERA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2012

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

DIRECTOR :

INGA. TANIA MARISELA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE
ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERA QUIMICO

Título :

**EVALUACIÓN FISICOQUIMICA DE ARCILLAS
NATURALES EXISTENTES EN EL CAMPO GEOTÉRMICO
DE BERLÍN, USULUTÁN Y ELABORACIÓN DEL
DIAGNOSTICO DE SU COMPORTAMIENTO REOLOGICO
DURANTE LA PERFORACION DE POZOS
GEOTERMICOS.**

Presentado por :

**BERTHA ARACELY ARENIVAR MARROQUÍN
GRISELDA CARLENI MARTÍNEZ PÉREZ
LAURA IVANIA RIVERA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. JUAN RODOLFO RAMIREZ GUZMÁN

San Salvador, Noviembre 2012

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Para el caso de uno solo:

Docente Director :

ING. JUAN RODOLFO RAMIREZ GUZMÁN

INDICE

INDICE DE TABLAS	9
AGRADECIMIENTOS.....	16
INTRODUCCIÓN	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
1. GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA.....	23
1.1 ORIGENES DE LA ENERGIA GEOTERMICA.....	23
1.2 SISTEMA GEOTÉRMICO	27
1.2.1 TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS Y PROCESOS DE EXTRACCION	29
1.3 TIPOS DE POZOS GEOTÉRMICOS	32
1.3.1 POZOS EXPLORATORIOS	33
1.3.2 POZOS DE EXPLOTACIÓN.....	35
2. QUÍMICA DE LAS ARCILLAS	36
2.1 DEFINICIONES.....	37
2.2 ORIGEN DE LAS ARCILLAS	37
2.2.1 ROCAS ÍGNEAS	38
2.2.2 ALTERACIÓN HIDROTERMAL.....	41
2.3 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS.....	47
2.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS ARCILLAS.....	50
2.4.1 SUPERFICIE ESPECÍFICA.....	50
2.4.2 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATION.....	52
2.4.3 CAPACIDAD DE ADSORCIÓN	54

2.4.4	HIDRATACIÓN E HINCHAMIENTO	55
2.4.5	PLASTICIDAD	56
2.5	TIPO DE ARCILLAS.....	58
2.5.1	ARCILLAS MONTMORILLONITA (ARCILLAS DE TRES CAPAS) ...	60
2.5.2	ILLITAS (ARCILLAS DE TRES CAPAS)	62
2.5.3	CLORITAS (ARCILLAS DE TRES CAPAS)	64
2.5.4	CAOLINITAS (ARCILLAS DE DOS CAPAS).....	66
3.	FLUIDOS DE PERFORACION	69
3.1	SISTEMA DE CIRCULACION DE FLUIDOS	71
3.2	FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN	76
3.2.1	ENFRIAR Y LUBRICAR LA BARRENA.....	76
3.2.2	TRANSMISION DE POTENCIA HIDRAULICA A LA BARRENA.....	77
3.2.3	TRANSPORTE Y ACARREO DE LOS RECORTES A LA SUPERFICIE	77
3.2.4	CONTROL DE LAS PRESIONES DE LA FORMACION	78
3.2.5	ESTABILIDAD DE LAS PAREDES DEL POZO.....	79
3.2.6	AYUDA EN TOMA DE REGISTROS ELECTRICOS	79
3.2.7	SUSTENTACION DE LA SARTA DE PERFORACION Y DE REVESTIMIENTO	79
3.2.8	SUSPENSION DE LOS RECORTES	80
3.3	FACTORES DE INFLUENCIA DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN	81
3.3.1	VELOCIDAD DE PERFORACION	81
3.3.2	LIMPIEZA DEL AGUJERO	81
3.3.3	ESTABILIDAD DEL AGUJERO	82
3.3.4	PROGRAMA DE REVESTIMIENTO.....	82

3.3.5	EVALUACION DE LA FORMACION.....	82
3.3.6	TIEMPO DE PERFORACION TOTAL Y COSTOS DE TERMINACION	83
3.3.7	SELECCION DEL EQUIPO	83
3.4	CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACION SEGÚN EL TIPO DE FORMACIÓN A PERFORAR	83
3.4.1	ARCILLAS DELEZNABLES.....	83
3.4.2	FORMACIONES CON ALTA TEMPERATURA	84
3.4.3	FORMACIONES CON PÉRDIDA DE CIRCULACION.....	84
4.	REOLOGÍA DE FLUIDOS.....	85
4.1	CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS	85
4.2	FLUIDOS NEWTONIANOS.....	86
4.3	FLUIDOS NO NEWTONIANOS	87
4.4	MODELOS REOLÓGICOS	89
4.5	MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM.	90
4.6	MODELO DE LEY EXPONENCIAL.....	90
5.	PRUEBAS DE LABORATORIO	93
5.1	PRUEBAS FISICOQUIMICAS	94
5.1.1	PRUEBA DE DENSIDAD	94
5.1.2	PRUEBA DE pH	94
5.1.3	PRUEBA DE AZUL DE METILENO.....	95
5.2	PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	95
5.3	PRUEBA DE ENJARRE.....	97
5.4	CONTENIDO DE ARENA	99
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	100

6.1	RESULTADO DE LAS PRUEBAS REOLOGICAS	100
6.2	RESULTADO DE PRUEBA DE AZUL DE METILENO Y VISCOSIDAD DE MARSH	116
7.	DIAGNÓSTICO.....	120
8.	PROPUESTA DE METODOLOGÍA A SEGUIR PARA EL CONTROL DE LOS EFECTOS DE ARCILLAS NATURALES DE LA FORMACIÓN EN EL PROCESO DE PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS	129
8.1	METODOLOGÍA	129
8.1.1	ETAPA 1: EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL CAMPO Y DE LA PERFORACIÓN	129
8.1.2	ETAPA 2: ANÁLISIS DEL PROCESO DE PERFORACIÓN	132
8.1.3	ETAPA 3: TOMA DE DECISIONES.....	134
	ETAPA DE 17½"φ.....	134
9.	CONCLUSIONES	142
10.	RECOMENDACIONES	144
11.	BIBLIOGRAFIA.....	145
12.	GLOSARIO.....	148
13.	ANEXOS	155
	ANEXO 1:	156
	ENSAYOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO	156

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE TEXTURA DE LA ROCA ÍGNEA. 6. (REF. 17)	39
TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN HIDROTERMAL SEGÚN EL MINERAL MÁS ABUNDANTE.....	45
TABLA 2.3 RANGO DE ÁREA SUPERFICIAL DE ARCILLAS.....	51
TABLA 2.4 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICICO DE LOS MINERALES DE ARCILLA.....	53
TABLA 2.5 CARACTERÍSTICAS DE LA MONTMORILLONITA	61
TABLA 2.6 CARACTERÍSTICAS DE LA ILITA.....	63
TABLA 2.7 PROPIEDADES GENERALES Y FISICOQUÍMICAS DE LA CLORITA.	65
TABLA 2.8 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CAOLINITA	67
TABLA 4.1 CLASIFICACIÓN DE UN FLUIDO NO-NEWTONIANOS.....	88
TABLA 6.1 LECTURAS DE REÓMETRO DE FANN DE LA SEMANA 1 DE MUESTREO DE LODO DE PERFORACIÓN.	101
TABLA 6.2 CONSOLIDADO DE LA PRIMERA SEMANA CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE BINGHAM Y DE POTENCIA	105
TABLA 6.3 CONSOLIDADO DE LA SEGUNDA SEMANA CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE BINGHAM Y DE POTENCIA	105
TABLA 6.4CONSOLIDADO DE LA TERCERA SEMANA CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE BINGHAM Y DE POTENCIA	106
TABLA 6.5CONSOLIDADO DE LA CUARTA SEMANA CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE BINGHAM Y DE POTENCIA	106
TABLA 6.6 CONSOLIDADO DE LA QUINTA SEMANA CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE BINGHAM Y DE POTENCIA	107
TABLA 6.7 CONSOLIDADO DE LA SEXTA SEMANA CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE BINGHAM Y DE POTENCIA	107

TABLA 6.8 CONSOLIDADO DE LA SÉPTIMA SEMANA CON LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE BINGHAM Y DE POTENCIA	108
TABLA 6.9 CONCENTRACIÓN RESULTANTE DE LA PRUEBA DE AZUL DE METILENO Y VISCOSIDAD DE MARSH	116
TABLA 7.1 MUESTRAS DE ARCILLAS ENCONTRADAS EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN POZO TR18B	123

INDICE FIGURAS

FIGURA 1.1 LA CORTEZA, MANTO Y NÚCLEO DE LA TIERRA. ARRIBA A LA DERECHA: UNA SECCIÓN A TRAVÉS DE LA CORTEZA Y DEL MANTO SUPERIOR.....	24
FIGURA 1.2 PERFIL ESQUEMÁTICO MOSTRANDO LOS PROCESOS DE TECTÓNICA DE PLACAS.....	25
FIGURA 1.3 PLACAS LITÓSFERAS, DORSALES OCEÁNICAS, FOSAS OCEÁNICAS, ZONAS DE SUBDUCCIÓN Y CAMPOS GEOTÉRMICOS.....	27
FIGURA 1.4 ESTRUCTURA DE UN CAMPO GEOTÉRMICO.....	29
FIGURA 1.5 ESQUEMA DE UNA PLANTA GEOTERMOELÉCTRICA DE CONDENSACIÓN.	30
FIGURA 1.6 ESQUEMA DE UNA PLANTA GEOTERMAL BINARIA.....	31
FIGURA 1.7 PERFIL DE UN POZO PRODUCTOR O DE EXPLORACIÓN	33
FIGURA 2.1 TIPOS DE ROCAS ÍGNEAS: (1) PLUTÓNICA, (2) VOLCÁNICA Y (3) FILONIANA.....	39
FIGURA 2.2 COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS	41
FIGURA 2.3 FOTOGRAFÍA DE UNA GEODA Y VISTA DE LOS CRISTALES AL INTERIOR DE LA GEODA.	42
FIGURA 2.4 ROCA INALTERADA (IZQUIERDA) Y ROCA CON ALTERACIÓN PERVASIVA (DERECHA) DEL ALMACÉN DE LAGEO EN AHUACHAPÁN .	44
FIGURA 2.5 DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN DE TIPO DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL.....	45
FIGURA 2.6 ESTRUCTURA ARGÍLICA INTERMEDIA DEL ALMACÉN DE LAGEO EN AHUACHAPÁN.....	46
FIGURA 2.7 ESTRUCTURA ARGÍLICA AVANZADA DE LAGEO AHUACHAPÁN	47
FIGURA 2.8 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS CAPAS TETRAÉDRICAS (SUPERIOR) Y OCTAÉDRICAS (INFERIOR)	48

FIGURA 2.9 DISPOSICIÓN PLANAR DE LAS ESTRUCTURAS PARA DAR UN LUGAR AL ESQUELETO DE LA ARCILLA	49
FIGURA 2.10 SUSTITUCIONES EN LAS CAPAS TETRAÉDRICAS Y OCTAÉDRICAS	53
FIGURA 2.11 ADSORCIÓN DE AGUA EN UN SISTEMA DE ARCILLA- AGUA.	55
FIGURA 2.12 INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS DE ARCILLA CON AGUA	56
FIGURA 2.13 CAPACIDAD DE ARCILLAS DE SER PLÁSTICAS EN PRESENCIA DE AGUA.....	57
FIGURA 2.14 ATAPULGITA (IZQUIERDA) Y UNA ROCA SEPIOLITA (DERECHA).....	59
FIGURA 2.16 ESTRUCTURA DE LA MONTMORRILLONITA.....	62
FIGURA 2.17 ESTRUCTURA DE LA ILITA/MICA.....	64
FIGURA 2.18 ESTRUCTURA DE LA CLORITA.....	66
FIGURA 2.19. ESTRUCTURA DE LA CAOLINITA.	68
FIGURA 3.9 A) TUBERÍA DE REVESTIMIENTO Y B) SARTA DE PERFORACIÓN	80
FIGURA 3.10 A) RECORTES DE PERFORACIÓN Y B) LODOS DE PERFORACIÓN EN REPOSO	81
FIGURA 4.1 COMPORTAMIENTO DE UN FLUIDO NEWTONIANOS	86
FIGURA 4.2 COMPORTAMIENTO DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO	87
FIGURA 6.1 REOGRAMA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA CADA SEMANA DE ESTUDIO.....	110
FIGURA 6.2 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS REOLÓGICOS CON LA TENDENCIA EXPERIMENTAL PARA EL FLUIDO DE PERFORACIÓN DE LA SEGUNDA SEMANA DE MUESTREO.....	111
FIGURA 6.3 REPRESENTACIÓN DE LA TENDENCIA DE LOS MODELOS REOLÓGICOS Y LA TENDENCIA EXPERIMENTAL EN ESCALA LOG-LOG ..	113

FIGURA 6.4 COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN PARA CADA SEMANA DE MUESTREO.....	114
FIGURA 6.5 PERFIL DEL FLUJO DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN Y EL COMPORTAMIENTO SEGÚN LOS MODELOS REOLÓGICOS	115
FIGURA 6.6 COMPORTAMIENTO DEL CONTENIDO DE ARCILLAS EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN Y LA VISCOSIDAD DE MARSH.....	118
FIGURA 6.7 COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD PLÁSTICA Y PUNTO DE CEDENCIA CON LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD.....	119
FIGURA 7.1 HISTORIA VOLCÁNICA Y EVOLUCIÓN GEOVULCANOLÓGICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN, USULUTÁN.	121
FIGURA 7.2 FORMACION ARCILLA REACTIVA.....	125
FIGURA 7.3 FORMACIONES PRESURIZADAS	126
FIGURA 7.4 FORMACIONES FRACTURADAS Y FALLAS.....	127
FIGURA 7.5 DESVIACIÓN Y REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DEL POZO POR INESTABILIDAD CAUSADO POR LAS ARCILLAS “SIDE TRACK”	128

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por permitirnos culminar nuestra carrera universitaria exitosamente y poder realizar un trabajo de graduación que ha sido una verdadera experiencia de vida que nos ha llenado de satisfacciones en todos los sentidos tanto académico como humano y práctico.

A nuestros Padres terrenales y Familiares

Que fueron nuestro apoyo moral y económico a lo largo de la carrera, que estuvieron ahí todos los días dándonos ánimos para que siguiéramos adelante y diéramos lo mejor de nosotras.

A Nuestros amigos y compañeros

Que fueron parte y nos acompañaron en todo el camino de la aventura de ser estudiantes universitarias, gracias por esas tardes haciendo ejercicios de diversas materias y las interminables noches de desvelo, que en grupo se hacían más fáciles y llevaderas.

A la universidad de El Salvador

Por permitirnos cursar la carrera de Ingeniería Química en sus aulas y formar parte de su prestigioso grupo de estudiantes.

Al Personal Docente de la escuela de Ingeniería Química

Por proporcionarnos toda nuestra formación académica y brindarnos las herramientas necesarias para enfrentarnos al mundo laboral. Agradecemos especialmente a nuestro asesor de tesis el Ingeniero Juan Rodolfo Ramírez Guzmán por su dedicación y esmero en la asesoría de nuestra tesis. Y a la Directora de la Escuela de Ingeniería Química ing. Tania torres Rivera por todo su apoyo durante toda la carrera y el trabajo de graduación.

A la Perforadora Santa Bárbara

Por permitirnos utilizar su laboratorio para desarrollar nuestra investigación. Agradecemos especialmente a los Ingenieros Javier Rivas y Jaime Arévalo por concedernos los permisos necesarios para hacer posible la realización de este trabajo de graduación en las instalaciones de la Perforadora Santa Bárbara. Agradecemos especialmente al Ingeniero Saúl Ramos y sus colaboradores por su valiosa ayuda y aporte en nuestra tesis.

Y finalmente agradecemos a todas las personas e instituciones que de alguna u otra forma nos ayudaron e hicieron posible el cumplimiento de nuestra tan ansiada meta de convertirnos en Ingenieras Químicos.

A todos ustedes, Gracias

AGRADECIMIENTOS.

Con la culminación de este trabajo de graduación; agradezco primero a Dios que sin el nada de esto hubiese sido posible.

A mis ángeles que me guían y protegen desde el cielo: mi madre Norma Silvia Marroquín; a mi abuela Bertha Aracely Valencia y a mi tío que más que eso fue un padre para mi Efraín Orlando Valencia.

A mis hermanas que me acompañaron y apoyaron en todo mi proceso de estudios.

A mis tíos y familiares que siempre me acompañaron, especialmente a mi Tío Ernesto Valencia y mi Tía Lucy Soriano; gracias por estar siempre a mi lado.

A mis profesores especialmente a mi asesor de tesis Ing. Juan Rodolfo Ramírez Guzmán; por brindarnos sus conocimientos e involucrarnos en el interesante mundo de la geotermia. Y a cada uno de los docentes de la Escuela de Ingeniería Química por brindarnos sus conocimientos.

Agradezco también a la Perforadora Santa Bárbara; y a todo su personal por recibirnos con tanta calidez humana y brindarnos toda la información y equipo necesario para la realización de nuestra investigación; en especial al Ing. Saúl Ramos.

A todos mis amigos que estuvieron compartiendo conmigo desvelos, días de estudio, triunfos y fracaso durante el transcurso de nuestra carrera; en especial a mis compañeras de tesis por su paciencia y cariño; por haber compartido este año lleno de aventuras , nuevos conocimientos y nuevas experiencias.

Sin más que agregar; gracias a todos y a cada uno de los que me han acompañado en esta parte de mi vida; terminando esta etapa termina un sueño; un sueño que es dedicado en especial a mi madre, que espero desde el cielo disfrute este triunfo conmigo.

BERTHA ARENIVAR

AGRADECIMIENTOS.

A Dios y la Virgencita que me han acompañado a lo largo de todo mi vida, bendiciéndome con salud, sabiduría, paciencia y los medios para salir adelante.

Agradezco de todo corazón y dedico este logro a mis padres: Gerardo Martínez Vásquez y Ana del Carmen de Martínez por todo su amor, comprensión, apoyo incondicional y sus consejos.

A mis hermanos Roxana y Gerardo por soportarme en todo momento y a mis dos angelitos: Josecito y Josué que han estado presentes en todo momento en mis pensamientos.

A mis amigos que estuvieron siempre en las buenas y malas para darme ánimos, escucharme y acompañarme en esas tardes de estudios que en la mayoría terminaban en noches de desvelos a ellos muchas gracias.

A todos los docentes de la escuela de Ingeniería Química que compartieron sus conocimientos y experiencias, en especial al Ing. Juan Ramírez quien nos dirigió, nos acompañó en el proceso de la realización de este trabajo.

Un agradecimiento especial también al Ing. Saúl Ramos de la Perforadora de Santa Bárbara por dedicar tiempo a explicarnos, compartir sus conocimientos, colaborar en esta investigación y por toda su amable atención.

Y finalmente agradezco a Tita y Lauri, mis amigas, compañeras de Tesis por toda su comprensión, cariño y por hacer de esta investigación una experiencia única y exitosa.

GRISELDA MARTÍNEZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por permitirme culminar mi carrera de Ingeniería Química y colmarme de sus gracias y bendiciones siempre.

A María Auxiliadora

Por llevarme siempre de su mano y acompañarme a lo largo de mi vida y mi carrera universitaria.

A la Memoria de mi Tía Merceditas

Esta va por usted Merceditas, gracias por haber sido mi madre, mi hermana, mi amiga, mi compañera de juegos, mi maestra, mi confidente, mi todo, espero que desde el cielo esté contenta conmigo y vea reflejado en este logro de mi vida todo su esfuerzo y dedicación que en los 25 años que vivimos juntas invirtió en mí. Por todo y mucho más, Gracias.

A mi Abuelita Toña

Vaya, hasta que lo logró su nieta adorada (conste que nunca ha aceptado que lo soy, pero yo sé que lo soy). Muchas Gracias por todo abuelita, por cuidarme, quererme, acompañarme, aconsejarme, regañarme, corregirme y sobre todo por apoyarme durante toda la carrera y toda mi vida.

A mi mami Rosita

Gracias por brindarme su apoyo y su ayuda siempre que lo necesito.

A mis padres y hermanos

Agradezco a mis padres todo su apoyo moral, espiritual y económico para la culminación exitosa de mis estudios y a mis hermanitos por acompañarme siempre, en especial a mi hermanita Anita que aunque es la más chiquita me cuida y me aconseja como gente grande.

A mi Padrino Ricardo

Gracias por abrirme las puertas de su casa y brindarme todo el apoyo que siempre necesité.

A mi Tío José

Gracias por apoyarme tanto a lo largo de mi carrera y en toda mi vida.

A mis compañeras de tesis Gris y Tita

Niñas, gracias por ser parte de esta gran aventura llamada tesis, que tuve la dicha de realizar con ustedes, hicimos un excelente equipo, las quiero chicas arcillas.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química

Por toda la paciencia y esmero que tuvieron para darme clases y transmitirme sus conocimientos, gracias, especialmente gracias a mi súper asesor de tesis al Ing. Juan Ramírez por esmerarse tanto dirigiéndonos y acompañándonos en todas las etapas y aventuras por las que pasamos durante la tesis. Agradezco especialmente también a la Ing. Tania Torres Rivera por su especial apoyo y comprensión en los momentos más difíciles de mi vida como estudiante y como persona.

Al Ing. Saúl Ramos de la Perforadora Santa Bárbara

Gracias por toda su colaboración y ayuda en nuestra tesis y atendernos con tanta delicadeza y amabilidad cada vez que llegábamos a realizar una visita al campo geotérmico de Berlín, Usulután.

A mis amigos y Compañeros

Gracias compañeritos por ser parte del camino rumbo a la ingeniería, todo hubiera sido más difícil y aburrido sin su ayuda. Gracias Cristi por ser mi mejor amiga y estar para mí siempre. Gracias Rene por tu ayuda, tu apoyo y tu lucha constante siempre a mi lado, Gracias Florcita por su sincera amistad e invaluable ayuda.

Mis salsitas: Marcia, Rocío, Luz, Sara y Andrea gracias por todos esos inolvidables momentos que vivimos juntas y sobre todo por cuidarme siempre, las quiero niñas.

LAURA RIVERA

INTRODUCCIÓN

Se considera a las arcillas como un mineral natural complejo constituido, principalmente, por una mezcla de aluminosilicatos cristalinos, a los que se denominan minerales arcillosos, y de otros silicatos y minerales de hierro, calcio, titanio, etc., acompañados frecuentemente por materia orgánica. Actualmente se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de capas y por la simetría que presenta su red cristalina.

Durante la perforación de pozos geotérmicos se ha encontrado la presencia de arcillas naturales que son originadas por la alteración hidrotermal de rocas ígneas, formando parte de la naturaleza del suelo y pueden llegar a ocasionar problemas durante la perforación, provocando embolamiento de barrenas, la cual es una herramienta utilizada para perforar el subsuelo y llegar hacia el reservorio geotérmico, las arcillas provocan en dichas herramientas una cantidad de adherencia que genera inconvenientes en el proceso, encareciendo los proyectos, ya sea por la interrupción en la operación o por la pérdida de la herramienta.

Por lo expuesto anteriormente, el objetivo de la investigación, es realizar un estudio fisicoquímico de las arcillas naturales existentes en el campo geotérmico de Berlín, Usulután y elaborar un diagnóstico de su comportamiento reológico durante el proceso de perforación. Para lo que se llevará a cabo un muestreo de arcillas en el campo geotérmico, se desarrollarán ensayos de plasticidad, peso específico del material arcilloso, viscosidad plástica, viscosidad aparente, prueba de enjarre; de pH de las arcillas, temperatura, resistencia de gel, determinación de azul de metileno y punto de cedencia (yield point); para conocer mejor las propiedades de las arcillas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al perforar pozos geotérmicos se añaden arcillas, como la bentonita en los lodos de perforación para proporcionar estabilidad al pozo entre otras razones; sin embargo, otros tipos de arcillas entran en el fluido de perforación como un contaminante principal, a través de la dispersión de los sólidos de perforación. En cualquiera de los casos, éstas se vuelven una parte activa del sistema, causando problemas en el equipo de perforación debido a ciertos atascamientos producidos por arcillas que en ocasiones producen que el proceso de perforación se detenga por tiempo indefinido.

Por lo tanto, una comprensión de las arcillas en la química básica, en sus propiedades fundamentales, la clasificación e identificación existentes en el campo geotérmico de Berlín, es una herramienta valiosa para un ingeniero de fluidos de perforación, para poder controlar adecuadamente el sistema.

El propósito de la investigación es conocer y evaluar fisicoquímicamente las arcillas existentes en el campo geotérmico de Berlín; Usulután para así establecer la influencia que estas ejercen en proceso de perforación y por medio de su estudio detallado elaborar un diagnóstico de su comportamiento reológico durante la perforación de pozos geotérmicos.

1. GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA

El término Geotermia se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil al ser humano.

Por lo tanto, nos referimos a la energía geotérmica como la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie de la Tierra, engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.

1.1 ORIGENES DE LA ENERGIA GEOTERMICA

Las características físicas y químicas de la corteza, manto y núcleo varían desde la superficie de la Tierra hasta su centro. La envoltura más externa de la Tierra, conocida como la litósfera corresponde a la corteza y al nivel superior del manto, su espesor varía de menos 80 km en las zonas oceánicas hasta sobre 200 km en áreas continentales, la litosfera se comporta como un cuerpo rígido. Bajo la litosfera está la zona conocida como astenósfera, de 200 a 300 km de espesor, la cual tiene un comportamiento menos rígido o más plástico que la litosfera, en otras palabras, a escala geológica en la cual el tiempo se mide en millones de años, esta porción de la Tierra se comporta prácticamente, en ciertos procesos, como un fluido (Fig. 1.1)

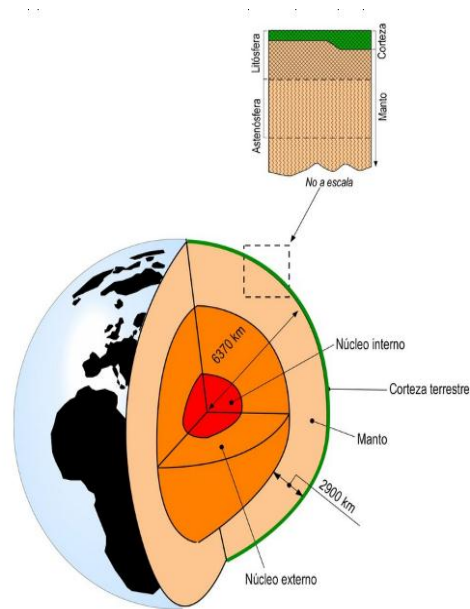


Figura 1.1 La corteza, manto y núcleo de la Tierra. Arriba a la derecha: una sección a través de la corteza y del manto superior.

Debido a la diferencia de temperatura entre los diferentes niveles de la astenósfera, se han originado movimientos convectivos y posiblemente celdas de convección. Su extremado movimiento lento convectivo (unos pocos centímetros por año), se mantiene mediante el calor producido por el decaimiento de elementos radioactivos y por el calor proveniente de las partes más profundas de la Tierra. Grandes volúmenes de rocas calientes profundas, menos densas y más livianas que el material circundante, ascienden con estos movimientos hacia la superficie, mientras que rocas superficiales más pesadas, densas y frías tienden a hundirse, se recalientan y ascienden a la superficie una y otra vez, en forma muy similar a lo que sucede al agua hirviendo en una caldera.

En aquellas zonas donde la litosfera es más delgada y especialmente en las áreas oceánicas, la litosfera es empujada hacia arriba y quebrada por el material parcialmente fundido muy caliente, que asciende desde la astenósfera, en concordancia con la rama ascendente de las celdas convectivas. Este es el mecanismo que originó y aún origina las dorsales oceánicas, que se extienden por más de 60,000 kilómetros debajo de los océanos.

En las zonas de subducción la litosfera se pliega y sumerge bajo la litosfera adyacente hasta zonas profundas muy calientes, donde es “digerida” por el manto y el ciclo se reinicia nuevamente. Parte del material litosférico vuelve al estado fundido y puede ascender hacia la superficie a través de facturas en la corteza. Consecuentemente, se forman arcos magmáticos con numerosos volcanes paralelos a las fosas, en el lado opuesto al de las dorsales. En las fosas localizadas en el océano, como en el Pacífico Occidental estos arcos magmáticos corresponden a cadenas de islas volcánicas; en las fosas ubicadas a lo largo de márgenes continentales los arcos magmáticos consisten en cadenas de montañas con numerosos volcanes, como en los Andes. La figura 1.2 ilustra este fenómeno

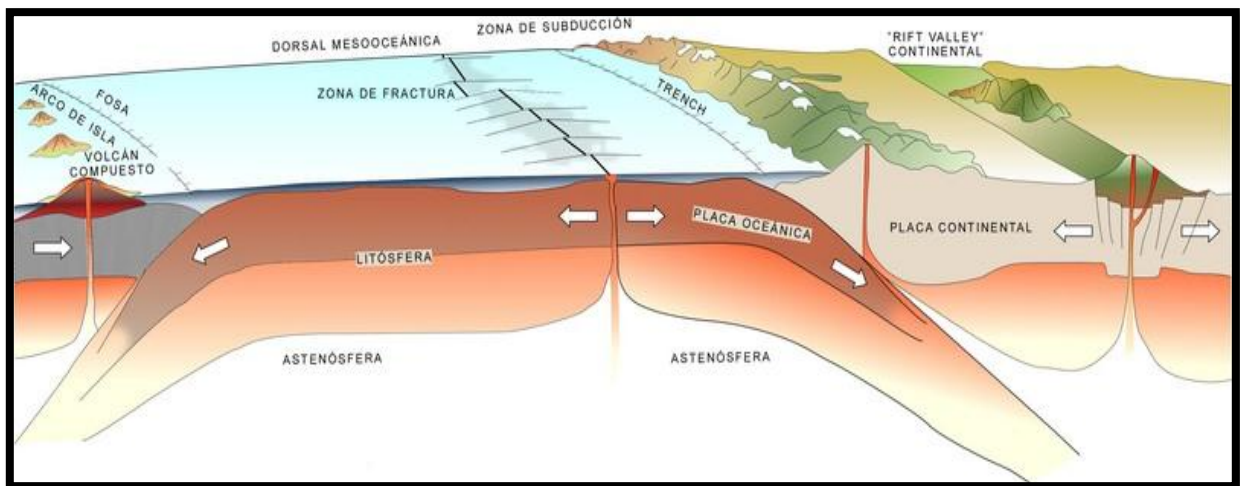


Figura 1.2 Perfil esquemático mostrando los procesos de tectónica de placas.

Las dorsales oceánicas, fallas transcurrentes y zonas de subducción constituyen una vasta red que divide nuestro planeta en seis placas o áreas litosféricas de grandes dimensiones además de varias otras placas más pequeñas. Debido a las enormes tensiones generadas por la máquina termal de la Tierra y la asimetría de las zonas que generan y consumen material litosféricas, estas placas derivan lentamente unas respecto de otras, cambiando continuamente de posición. Los

márgenes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo calórico terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie. Como se muestra en la Figura 1.3, las áreas geotermales más importantes se ubican alrededor de los márgenes de placas, además se clasifican en tres principales áreas geológicas y geodinámicas.

Donde la gran placa oceánica terrestre y la de su corteza colisionan y se montan una sobre la otra, en la llamada zona de subducción. El mejor ejemplo de estas “regiones calientes” se encuentra alrededor de los márgenes de las placas en el Anillo de Fuego, formado por áreas que bordean el Océano Pacífico: la cadena de los Andes Sudamericanos, América Central, México, la cordillera de Estados Unidos y Canadá, la cordillera aleutiana de Alaska, la península de Kamchatka en Rusia, Japón, las islas Filipinas, Indonesia y Nueva Zelanda.

- Centros que se expanden, donde las placas tectónicas se están fragmentando, como ocurre en Islandia, los rios de África y la zona del Atlántico medio.
- Los “puntos calientes” son sitios fijos en el manto terrestre que producen continuamente magma. Dado que la placa geológica siempre se está moviendo a lo largo del “punto caliente”, allí se forman manantiales y volcanes, como sucede en las islas hawaianas.

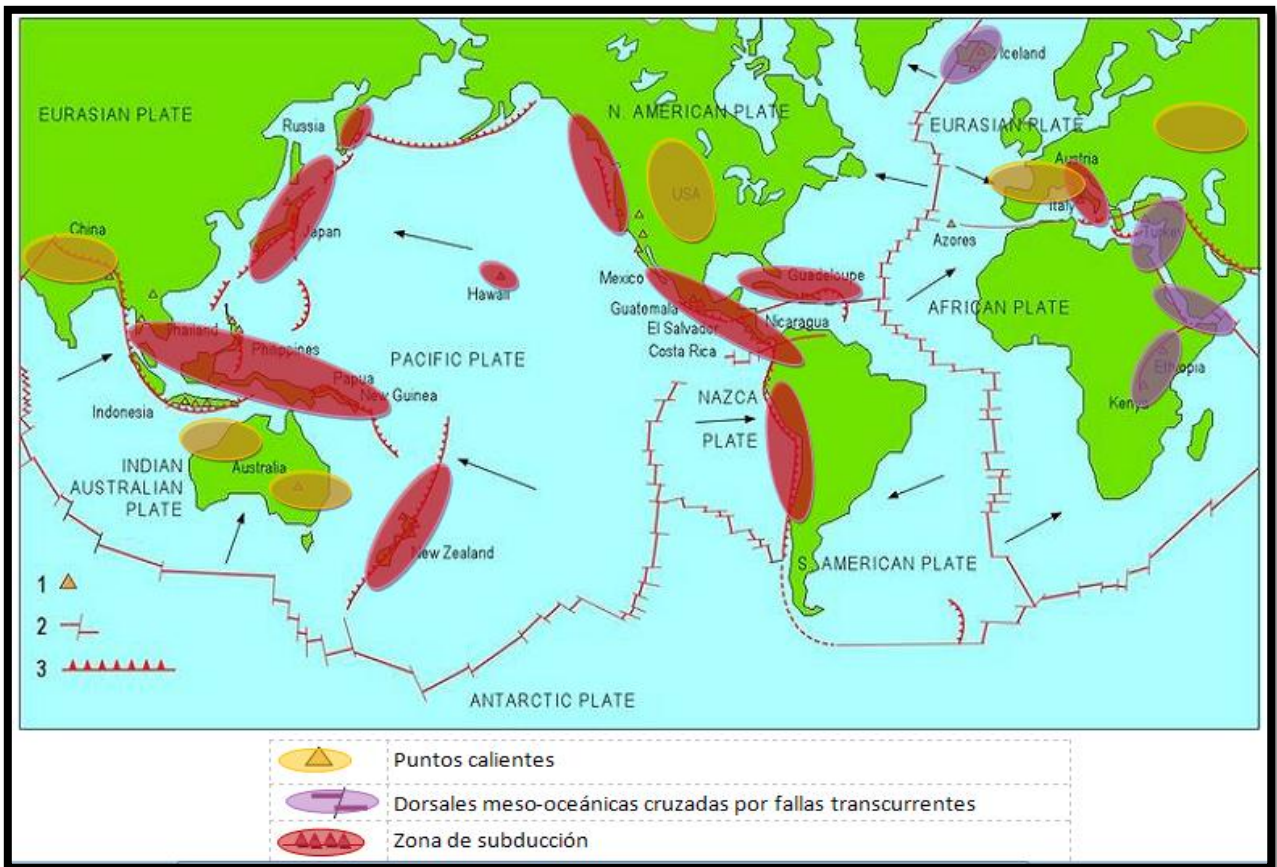


Figura 1.3 Placas litósferas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas muestran la dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción. (Ref. 11)

1.2 SISTEMA GEOTÉRMICO

El aprovechamiento de la energía geotérmica proveniente de cualquier área geotermal descrita con anterioridad, está constituido por tres procesos principales, estos son:

- 1) La perforación de pozos para extraer el fluido geotérmico del reservorio.
- 2) La separación y transporte de fluidos en superficie y;
- 3) La conversión de la energía geotérmica a energía eléctrica.

El primero se realiza en el área que se conoce como Campo Geotérmico; en el segundo, una parte de las instalaciones se encuentran en el Campo y otras dentro

del sitio que se denomina como la Planta Geotérmica; y el tercer proceso se realiza dentro de esta última.

Un sistema geotérmico o campo geotérmico se identifica como aquella área de la corteza terrestre que posee los siguientes elementos (Fig. 1.4):

- a. **Capa sello:** Representa el estrato más superficial del sistema, compuesto por formaciones prácticamente impermeables, que actúan como un aislante que impide el escape, hacia la superficie, tanto del calor como de los fluidos almacenados por debajo de ella.
- b. **Reservorio geotérmico:** Este estrato está generalmente formado por rocas calientes y permeables con un volumen suficientemente grande que permiten el almacenamiento y circulación de fluidos (agua y/o gases), a alta temperatura y presión. El reservorio es la parte más importante del campo pues es el estrato que almacena el fluido de trabajo (vapor) utilizado para la generación de energía eléctrica.
- c. **Recarga:** La existencia de una formación que tenga capacidad de almacenamiento de fluidos geotérmicos requiere, necesariamente, de una alimentación, la cual es generalmente el agua de lluvia, que se infiltra tanto en el campo como en las zonas aledañas al mismo a través de fallas geológicas, chimeneas de volcanes y cualquier otro tipo de permeabilidad que exista en el área.
- d. **Basamento:** Es la base del reservorio y está formado por rocas impermeables, por lo cual la transmisión de calor se produce principalmente, por mecanismo de conducción desde la fuente de calor.
- e. **Fuente de calor:** Dentro de un sistema geotérmico, la transferencia de calor necesaria para la existencia de las características de alta presión y temperaturas en reservorio generalmente se produce a través de intrusiones magmáticas situadas a niveles relativamente profundos de la corteza terrestre (5-15 km) cuya temperatura puede oscilar entre los 600 y 900 °C.

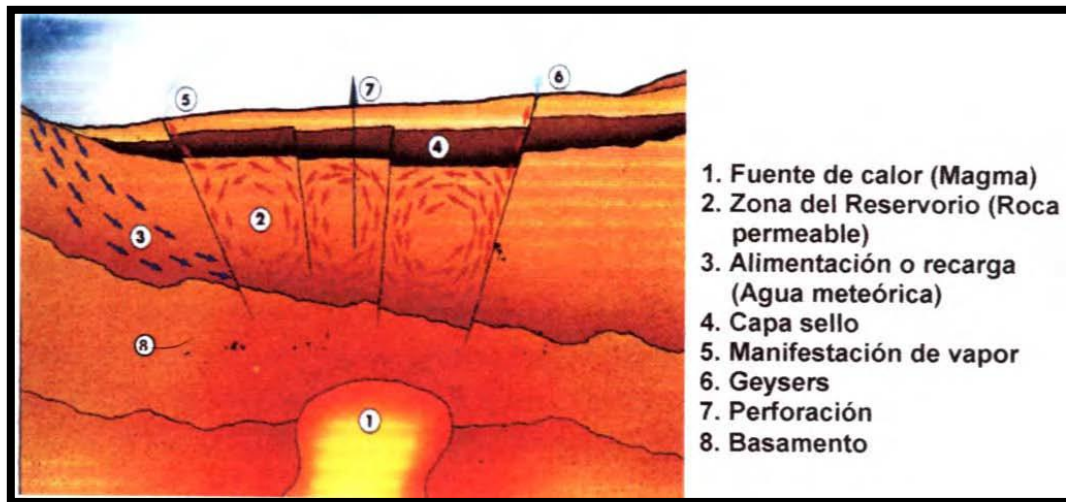


Figura 1.4 Estructura de un campo geotérmico

1.2.1 TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS Y PROCESOS DE EXTRACCION

Se requieren varios elementos para que exista un campo geotérmico: un techo compuesto de una cobertura de rocas impermeables; un depósito, o acuífero, de permeabilidad elevada entre 300 y 2000 metros de profundidad; rocas fracturadas que permitan una circulación convectiva de fluidos, y por lo tanto la transferencia de calor de la fuente a la superficie, y una fuente de calor magmático, entre 3 y 10 kilómetros de profundidad a 500-600°C.

Cada uno de los sistemas geotérmicos tiene distintas características las cuales se reflejan en su composición mineral, el quimismo del fluido y sus potenciales aplicaciones. En base a esto podemos decir que los diferentes tipos de sistemas geotérmicos se clasifican en:

A. Sistemas hidrotermales:

- **Vapor dominante:** alta entalpía, generalmente vapor seco, se localizan en las zonas activas de la corteza terrestre. Su temperatura está comprendida entre 200 y 400 grados centígrados. Una reserva geotérmica de ese tipo es utilizada en una central de vapor, el principio de esta es que el vapor, directamente de pozos de vapor seco o, después de la separación, desde pozos de vapor húmedo, es

pasado a través de la turbina y luego a las unidades de condensación y equipos auxiliares. La figura 1.5 ilustra lo descrito.

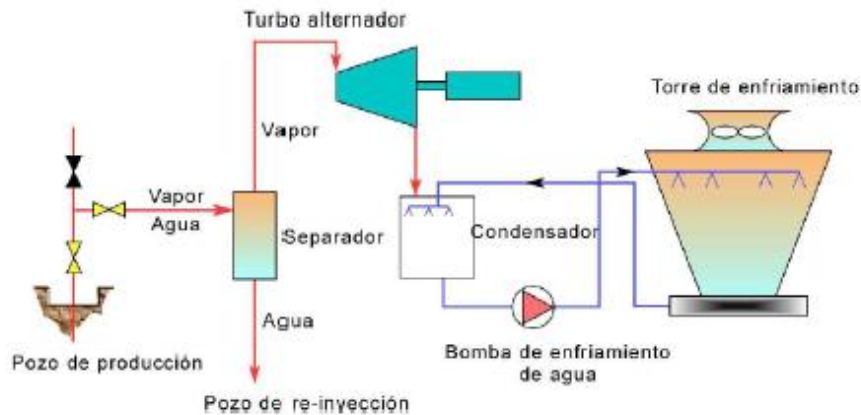


Figura 1.5 Esquema de una planta geotermoeléctrica de condensación. El flujo del fluido de alta temperatura está indicado en rojo y el agua fría en azul.

- **Líquido dominante (alta entalpía):** son aquellos en que los fluidos de los acuíferos están a temperaturas menos elevadas, normalmente entre 100 y 200 grados centígrados. Una reserva de este tipo no tiene suficiente calor para producir vapor de forma rápida, pero puede ser utilizada para generar electricidad en una central de ciclo binario, donde la conversión vapor- electricidad tiene un menor rendimiento, por lo que debe utilizarse, como intermediario, un fluido volátil. En un sistema binario, el agua geotérmica pasa a través de un intercambiador de calor, donde el calor es transferido a un segundo líquido, que hierve a temperaturas más bajas que el agua. Cuando es calentado, el líquido binario se convierte en vapor que se expande y mueve a la turbina. El vapor es luego convertido en líquido y utilizado repetidamente. En este ciclo cerrado, no hay emisiones a la atmósfera. Este proceso se describe en la figura 1.6.

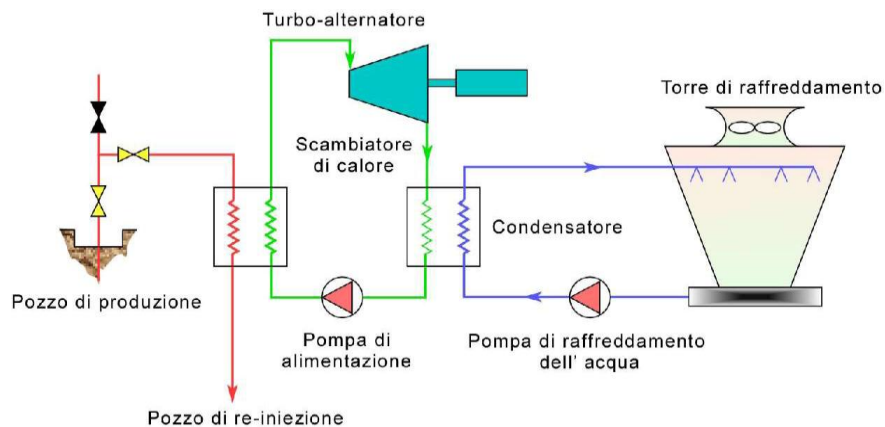


Figura 1.6 Esquema de una planta geotermal binaria. El flujo del fluido geotermal está en rojo, el fluido secundario en verde y el agua fría en azul.

- **Líquido dominante (baja entalpía):** son aprovechables en las zonas más amplias que en las anteriores, como en las cuencas sedimentarias, donde los fluidos se encuentran a temperaturas entre los 50 y 100 grados centígrados. Este tipo de explotación comercial de los recursos endógenos terrestres se utiliza para necesidades domésticas, de recreación; o actividades agrícolas y agroindustriales, sean estas urbanas o rurales.
- B. Roca seca caliente:** muy abundantes. Contenido energético en 10 Km superficiales de corteza es superior a 500 veces la energía de los sistemas de petróleo y gas. Alemania, Australia, Francia, Suiza e India son países donde se han dado pasos para explotación comercial.
- C. Geopresurizados:** contienen agua y gas disuelto a alta presión y temperaturas moderadas. Comprende tres tipos de energía (térmica, química y mecánica).
- D. Submarinos:** alta entalpía en el fondo del mar, actualmente no explotados comercialmente hasta ahora. Se encuentran en el Golfo de California es 500 veces más grande que Campo Cerro Prieto.

E. Magmáticos: sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos. No se explotan comercialmente en la actualidad. Temperaturas mayores a 800 °C. Podrían explotarse a mediano o largo plazo con el desarrollo de tecnologías y materiales resistentes a la corrosión y temperaturas.

De estos sistemas geotérmicos la clave de toda explotación geoelectrica se centra en el fluido geotérmico, que consiste en una mezcla de vapor y agua, el cual es extraído hacia la superficie a través de un pozo de producción. Este proceso y su clasificación se muestran a continuación.

1.3 TIPOS DE POZOS GEOTÉRMICOS

Los pozos geotérmicos se clasifican en productores y reinyectores. Los primeros son utilizados para extraer el vapor del reservorio, el cual es conducido hasta la turbina para generar electricidad. En cambio los segundos, conducen el agua residual del campo geotérmico para ser de vuelta al reservorio a través de ellos.

Los pozos suelen tener un diseño telescópico; ya que la perforación se va desarrollando por etapas, en las cuales hay diámetros de mayor a menor. En algunos casos se inicia perforando un agujero de 34 pulgadas de diámetro, hasta una profundidad de 100 m. Se corre tubería, se cementa para fijarla al subsuelo y luego se continua perforando y corriendo tubería de 20 pulgadas y al llegar a la profundidad deseada, se coloca una tubería ranurada de 12 pulgadas de diámetro y es a través de esas ranuras que gracias a la presión del reservorio se extrae la mezcla de vapor y agua caliente hacia la superficie (figura 1.7)

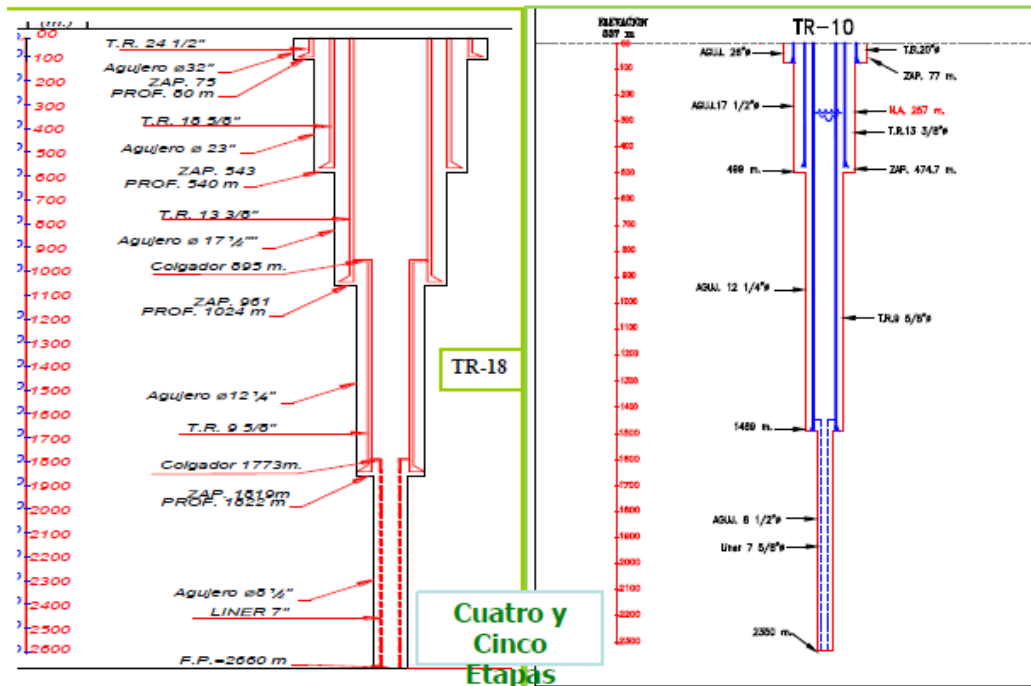


Figura 1.7 Perfil de un pozo productor o de exploración (izquierda) y el perfil de un pozo de reinyección (derecho).

Entonces el proceso de exploración de un campo geotérmico, los pozos que se perforan suelen conocerse como exploratorios, y por otro lado dependiendo de la profundidad de los mismos también se les suele conocer como someros o profundos.

La clasificación de los pozos los pozos geotérmicos es la siguiente:

1.3.1 POZOS EXPLORATORIOS

La perforación de pozos exploratorios es una tarea que se hace en la última fase de la exploración geotérmica. El número, ubicación y profundidad de los mismos estará determinado por los resultados obtenidos en las etapas previas, esto es, después de conocer la condición geológica estructural del campo, las zonas de mayor anomalía térmica, la probable ubicación del reservorio y el patrón tentativo de circulación del agua subterránea.

El objetivo de estas perforaciones es: corroborar, ampliar y eventualmente modificar los conocimientos obtenidos en la fase de exploración superficial.

Durante la perforación de pozos exploratorios se efectúan siguientes tareas:

A. Reconstrucción de la secuencia estratigráfica.

El control de esta secuencia es muy importante para la programación de las operaciones de perforación: elección de trépanos, fluido de perforación, programa de perforación, diseño del pozo, etc.

Consiste en las siguientes operaciones:

- Muestras de recortes para el control estratigráfico (generalmente cada 5 metros).
- Núcleos testigos para una más detallada información de la litología y textura de la roca, basándose en la información deducida a partir de los recortes.
- Núcleos testigos para análisis de las características físicas de las rocas (porosidad, permeabilidad, densidad, conductividad térmica, conductividad eléctrica, etc.).

B. Muestreo de fluido.

Tiene por finalidad detectar todos los estratos productores atravesados durante la perforación con el fin de reconstruir el esquema hidrológico y su columna estratigráfica.

C. Medidas de temperatura.

Las medidas de temperatura se realizan mediante el registro de temperatura dinámico y estático que permiten diferenciar las zonas del pozo en las cuales la transmisión de calor se hace por conducción (horizontes impermeables) y otras en las que predominan los fenómenos convectivos (horizontes permeables).

Con las mediciones de temperatura en el pozo en reposo, se calcula la temperatura de la formación (temperatura con tiempo de reposo tendiendo a infinito).

D. Medidas de presión.

Tienen como objetivo conocer:

- Nivel del fluido en el pozo.
- Presiones de formación de los fluidos.
- Presión en el pozo en función de las condiciones de cabeza de pozo (durante la inyección o producción).

E. Registros eléctricos.

Se usan para conocer la verdadera resistividad de la formación y reconocer horizontes fracturados o variaciones litológicas en la secuencia estratigráfica.

1.3.2 POZOS DE EXPLOTACIÓN

Los pozos de explotación permiten el uso completo de las técnicas de perforación. Las profundidades máximas de estos pozos son de 3000 metros, aunque en El Salvador se han realizado en el rango de 600 a 2500 metros y prácticamente la perforación de estos implica seguir la misma metodología para la perforación de un pozo de exploración con la diferencia en el diámetro de pozo, ya que lo de explotación o producción tienden a ser de mayor diámetro y por lo general, por razones económicas un pozo de exploración de acuerdo a las características o propiedades del fluido encontrado puede ser reorientado como un pozo de producción.

Además es importante mencionar que en el proceso de perforación de cualquier tipo de pozo, en nuestro país es en la fase de 17 ½ pulgadas de diámetro agujero (véase Fig. 1.7) que se perciben los problemas causados por la hidratación de arcillas, causando la pegadura de tuberías y cambios de propiedades del fluido de perforación los cuales se presentaran en los capítulos siguientes.

Cabe recalcar que el hecho de enfocarse en la fase de 17 ½ pulgadas es porque se dan los problemas más críticos durante la perforación pero las arcillas están presentes en todas las fases, en toda la columna estratigráfica, la diferencia radica en sus composiciones y propiedades.

Por lo tanto, en el siguiente capítulo se presentan las características y propiedades de las arcillas que se encuentran durante el proceso de perforación.

2. QUÍMICA DE LAS ARCILLAS

Como ya se mencionó las Arcillas están presentes en las primeras fases de perforación de un pozo geotérmico, en la cual es la composición de los minerales de arcillas las que varían y le dan características diferentes. Entonces, para realizar la evaluación de las propiedades tanto reológicas como fisicoquímicas de las arcillas es necesario estudiar de forma previa la química de las mismas; por lo que para tales fines se tratará en el capítulo el origen de las arcillas, su composición, estructura y sus propiedades fisicoquímicas; para luego conocer la clasificación de las arcillas que se encuentran comúnmente en la perforación de pozos geotérmicos.

Para muchos, arcilla tiene el significado clásico de ser un material cerámico y por ende, constituyente básico de las piezas de cerámica, una antigua forma de expresión de la humanidad. Otras aplicaciones son en la industria del papel, hule, refractarios, de colorización de alimentos y productos químicos, construcción, medicina, etc., que ha transformado lo que era una simple operación minera en una tecnología compleja y especializada.

La literatura sobre arcillas es abundante y compleja pero escasa y ambigua en el aspecto práctico de industrialización y referente al área geotérmica, particularmente en El Salvador. Ello se debe, posiblemente, a que sus propiedades, que dependen de su estado físico e historia geológica, pueden modificarse con relativa facilidad y sus amplios usos, son función de sus propias características y de las que resulten al asociarse con otras sustancias. En cualquier caso, el resultado es una tecnología compleja, especializada de escasas especificaciones, en la que la importancia geotérmica o la aceptación industrial es decidida por un criterio complejo individual de cada caso.

El Salvador es abundante en arcillas. Sin embargo, la geología y mineralogía de las arcillas o su significado en procesos geológicos y geotérmicos han sido escasamente desarrolladas. De aquí que sea recomendable la divulgación de un

criterio básico elemental sobre aspectos de orígenes de las arcillas, su estructura, tipos y propiedades fisicoquímicas y reológicas de las arcillas.

2.1 DEFINICIONES

Existen numerosas definiciones que describen la naturaleza física y química de las arcillas en diversas bibliografías, por lo que para fines prácticos se toman en cuenta las siguientes:

Según (Bernal, I., H. et al. 2003, citado por Muñoz, Muñoz, Mancía y Rogriguez-Paez 2007, pág. 538): “Se considera a las arcillas como un mineral natural complejo constituido, principalmente, por una mezcla de aluminosilicatos cristalinos, a los que se denominan minerales arcillosos, y de otros silicatos y minerales de hierro, calcio, titanio, etc., acompañados frecuentemente por materia orgánica”. Actualmente se conoce que las arcillas contienen otra serie de compuestos que las conforman estructuralmente, los materiales arcillosos son numerosos y difieren entre sí.

“Químicamente, los minerales arcillosos están constituidos por láminas de tetraedros de silicio [SiO_4] y de octaedros de aluminio [AlO_6]. La combinación de estas láminas forma los diferentes tipos de estructuras arcillosas que a su vez dan origen a paquetes de capas y que al combinarse conforman una placa de mineral arcilloso visible” de acuerdo a García Romero, E y Suárez Barrios, (M. 2005) citado por Muñoz et. al. (2007, pág. 538).

2.2 ORIGEN DE LAS ARCILLAS

La génesis de las arcillas comprende dos importantes factores que son la presencia de rocas ígneas y la ocurrencia de alteraciones hidrotermales, es decir la reacción química de interacción agua-roca en la litósfera terrestre que dará origen a las mismas con el paso del tiempo. A continuación se muestran los tipos de rocas ígneas según su ubicación y textura; las alteraciones hidrotermales, los factores que la generan y su clasificación.

2.2.1 ROCAS ÍGNEAS

Rocas Ígneas, son aquellas generadas por el enfriamiento del magma; roca fundida que normalmente contiene algunos cristales en suspensión y gases disueltos, principalmente vapor de agua, que están confinados dentro del magma por la presión de las rocas circundantes; el magma es expulsado durante las erupciones volcánicas, originando así a las rocas ígneas.

Existen 3 tipos de rocas magmáticas o ígneas que son:

- **Plutónicas:** se forman cuando el magma solidifica en el interior de la Tierra. Como en el interior las temperaturas son elevadas, el enfriamiento de los magmas es muy lento. En estas condiciones los minerales disponen de mucho tiempo para crecer, por lo que estas rocas presentan cristales relativamente grandes. Ejemplo de estas son los granitos y el gabro.
- **Volcánicas:** se originan cuando los magmas enfrían en la superficie terrestre, a temperaturas y presiones bajas, en estas condiciones el enfriamiento es muy rápido con lo que los cristales disponen de muy poco tiempo para formarse y crecer. El resultado son rocas constituidas por una masa de cristales de pequeño tamaño o bien materia amorfa sin cristalizar, como por ejemplo el vidrio, el basalto, la riolita, la piedra pómez y la obsidiana.
- **Filonianas:** Los magmas también pueden cristalizar en el interior de grietas o fracturas en las que las presiones y temperaturas no son tan elevadas como las que soportan las rocas plutónicas durante su formación, ni tan bajas como las de las rocas volcánicas. A estas se les denominan rocas filonianas. Ejemplos de estas son los pórfidos y las pegmatitas.

En la figura 2.1 puede verse un esquema de los distintos tipos de roca ígnea existentes:

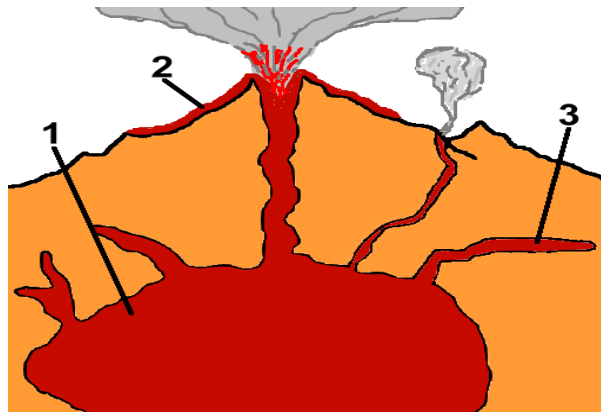


Figura 2.1 Tipos de Rocas Ígneas: (1) Plutónica, (2) Volcánica y (3) Filoniana

A. TEXTURAS ÍGNEAS

La textura en rocas ígneas se utiliza para describir el aspecto general de la roca en función del tamaño, forma y ordenamiento de los cristales. Existen tres factores que contribuyen a la textura de las rocas ígneas:

1. La velocidad a la cual se enfría el magma.
2. La cantidad de sílice presente.
3. La cantidad de gases disueltos en el magma.

En la tabla 2.1 se muestra el tipo de textura que puede tener este tipo de roca y una breve descripción de la misma.


TEXTURA DE ROCA	DESCRIPCION	EJEMPLO
TEXTURA AFANÍTICA (DE GRANO FINO)	Las rocas ígneas que se forman en la superficie o como masas pequeñas dentro de la corteza superior donde el enfriamiento es relativamente rápido, poseen este tipo de textura.	 <p>Pumita con textura Afanítica.</p>

Tabla 2.1 Clasificación según el tipo de textura de la roca ígnea. 6. (Ref. 17)

Continuación de Clasificación de rocas ígneas.

TEXTURA DE ROCA	DESCRIPCION	EJEMPLO
TEXTURA FANERÍTICA (DE GRANO GRUESO).	Cuando grandes masas de magma se solidifican lentamente muy por debajo de la superficie, forman las rocas ígneas que muestran una estructura de grano grueso.	 <p>Gabro con textura Fanerítica</p>
TEXTURA PORFÍDICA	Se refiere a la roca ígnea que tiene grandes cristales incrustados en una matriz de cristales más pequeños	 <p>Textura Porfídica, Pórfido.</p>
TEXTURA VÍTREA	Durante algunas erupciones volcánicas la roca fundida es expulsada hacia la atmósfera donde se enfría rápidamente, formando una roca con textura vítrea	 <p>Obsidiana con textura vítrea</p>

B. COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS

En la figura 2.2 se observa un diagrama con la serie de reacciones de Bowen para la composición de las rocas ígneas.



Figura 2.2 Composición de las Rocas Ígneas

Las rocas ígneas, sometidas al intemperismo, son transformadas debido a las alteraciones hidrotermales, dando así origen por medio del proceso de argilización a las arcillas.

2.2.2 ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal es el término que describe la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en términos químicos y termales, debido a la presencia de agua caliente, vapor o gas.

La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma.

Un ejemplo de alteración hidrotermal son las Geodas, que son una cavidad rocosa, normalmente cerrada, en la que han cristalizado minerales que han sido conducidos hasta ella disueltos en agua subterránea y cuyos cristales son de gran tamaño debido a la poca presión a la que se han producido. A continuación se muestran las fotografías de una geoda del almacén de rocas de LaGeo en Ahuachapán:

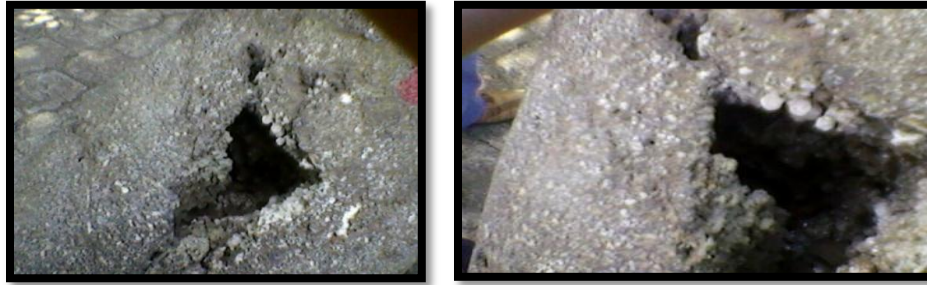


Figura 2.3 Fotografía de una Geoda y vista de los cristales al interior de la geoda.

La característica principal de la alteración hidrotermal es la transformación de un conjunto mineral inicial en una nueva asociación de minerales más estable bajo las condiciones hidrotermales de temperatura, presión pero sobre todo de composición de fluidos. La textura original de la roca puede ser modificada ligeramente o completamente a causa de la alteración hidrotermal.

Para que ocurra una alteración hidrotermal, necesariamente implica la circulación de volúmenes relativamente considerables de fluido caliente sobre la roca porosa o con fisuras.

El fluido tiende a estar considerablemente fuera de equilibrio termodinámico con las rocas adyacentes y esto genera las modificaciones en la composición mineralógica original de las rocas, esto es, pues, debido a que los componentes en solución los minerales sólidos se intercambian para lograr un equilibrio termodinámico.

El transporte de materiales involucrados en la alteración hidrotermal de las rocas puede ocurrir por infiltración o por difusión (transporte por difusión de especies químicas a través de fluidos estancados en los poros de las rocas) o por una combinación de ambos procesos.

La susceptibilidad a la alteración es variable en los minerales primarios de las rocas. El más reactivo es el vidrio volcánico, frecuentemente alterado primero a ópalo, esmectita, calcita o zeolita y luego a minerales de arcilla.

A. FACTORES QUE CONTROLAN LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL DE LAS ROCAS.

- 1) Temperatura y la diferencia de temperatura (ΔT°) entre la roca y el fluido que la invade: mientras más caliente el fluido mayor será el efecto sobre la mineralogía original.
- 2) Composición del fluido; sobre todo el pH del fluido hidrotermal: mientras más bajo el pH (fluido más ácido) mayor será el efecto sobre los minerales originales.
- 3) Permeabilidad de la roca: Una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración. Sin embargo, los fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico de las rocas o disolución de minerales generando permeabilidad secundaria en ellas.
- 4) Duración de la interacción agua/roca y variaciones de la razón agua/roca. Mientras mayor volumen de aguas calientes circule por las rocas y por mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas.
- 5) Composición de la roca; la proporción de minerales es relevante para grados menos intensos de alteración, dado que los distintos minerales tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, pero en alteraciones intensas la mineralogía resultante es esencialmente independiente del tipo de roca original.
- 6) Presión: este es un efecto indirecto, pero controla procesos secundarios como la profundidad de ebullición de fluidos, fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales) y erupción o explosiones hidrotermales.

Existen dos términos generales que cuantifican porcentualmente la intensidad y la extensión de la alteración hidrotermal en la roca, estos términos son:

- a) Pervasividad: Indica la intensidad de la alteración y es aquella en que la roca está completamente alterada en todo su volumen, en contraposición a alteraciones poco pervasivas donde la alteración se limita a las vecindades

de las fracturas por donde circuló el fluido, pero las partes masivas de las rocas están inalteradas.

b) Extensividad: Indica la distribución espacial de la alteración hidrotermal.



Figura 2.4 Roca Inalterada (izquierda) y Roca con alteración pervasiva (derecha) del almacén de LaGeo en Ahuachapán

La alteración hidrotermal produce cambios en las propiedades de las rocas alterando su densidad (aumento o disminución), porosidad, permeabilidad (aumento o disminución), susceptibilidad magnética (usualmente disminuye, pero puede aumentar cuando se deposita magnetita hidrotermal) y resistividad (usualmente decrece porque los sulfuros metálicos permiten el paso de corrientes eléctricas, pero masas silíceas producto de alteración pueden ser más resistivas).

B. CLASIFICACIÓN DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL

La alteración hidrotermal produce un amplio rango de mineralogía, abundancia mineral y texturas en distintas rocas. Esto hace que sea complicado tener un criterio uniforme para la clasificación de tipos de alteración. Los autores de mapeos y de estudios de alteración generalmente han simplificado sus observaciones clasificando las rocas alteradas en grupos.

El método más simple es mediante la utilización del mineral más abundante y más evidente en la roca alterada. De ahí derivan denominaciones como:

DENOMINACION	PRESENCIA DOMINANTE DE
Silicificación	Sílice o cuarzo
Sericitización	Sericita
Argilitación	Minerales de arcilla
Clorotización	Clorita
Epidotización	Epidota
Actinolitización	Actinolita

Tabla 2.2 Clasificación hidrotermal según el mineral más abundante

Aunque esta nomenclatura se emplea comúnmente, en realidad los minerales de alteración no se presentan individualmente sino que forman ciertos grupos o asociaciones de minerales de alteración.

En 1967 Meyer y Hemley clasificaron la alteración hidrotermal en los tipos: propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada, sericítica y potásica.

Corbett y Leach (1998) publicaron un diagrama de clasificación de tipo de alteración hidrotermal en que se incluyen los principales tipos clásicos de tipos de alteración ordenados en función del pH del fluido y de la temperatura (Figura 2.5).

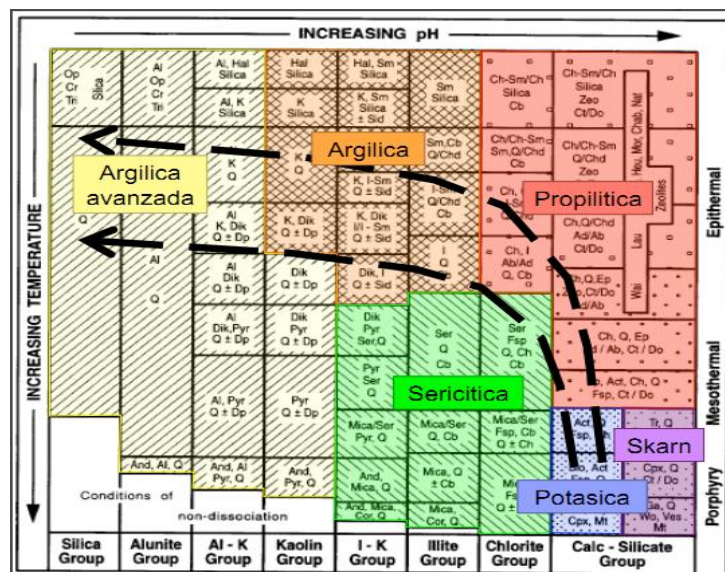


Figura 2.5 Corbett y Leach (1998) Diagrama de clasificación de tipo de alteración hidrotermal

Estos autores separaron además grupos caracterizados por ciertos minerales a saber: Grupo de la Sílice, Grupo de la Alunita, Grupo del Caolín, Grupo de la Ilita, Grupo de la Clorita, Grupo de los Calco-Silicatos.

En el apartado anterior, pudo observarse la clasificación que Meyer y Hemley (1967) hacían de las alteraciones dependiendo del tipo y cantidad de material encontrado en las mismas, contándose entre estas a las que dan su génesis a las arcillas, que son la argílica intermedia y la argílica avanzada.

- **Argílica Intermedia:** En este tipo de alteración, se aprecian importantes cantidades de caolinita, montmorillonita, esmectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. La alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica.



Figura 2.6 Estructura argílica intermedia del almacén de LaGeo en Ahuachapán

- **Argílica avanzada:** En este tipo de alteración gran parte de los minerales de las rocas transformados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas en que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato de Aluminio (alunita) y óxidos de Aluminio (diásporo). En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa

de sílice oquerosa residual (“vuggysilica” en inglés). La columna litográfica que puede verse a continuación, corresponde a una estructura argílica avanzada, es decir caracterizada por la destrucción total de feldespatos en condiciones de una hidrólisis muy fuerte, dando lugar a la formación de caolinita y/o alunita. Estructuras formadas en condiciones de 180°C a 250°C.



Figura 2.7 Estructura argílica avanzada de LaGeo Ahuachapán

2.3 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS

Como anteriormente se definió, las arcillas son esencialmente silicatos hidratados de aluminio formados por hidrólisis natural o acción atmosférica (meteorización) de los feldespatos y varios aluminosilicatos alcalinos originarios de rocas ígneas.

Debido a su insolubilidad en los solventes habituales han sido difíciles de investigar y caracterizar. Se identifican alrededor de siete sustancias arcillosas químicamente diferentes de las cuales: Caolinitas ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) y Montmorillonitas ($Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 2H_2O$) son las más importantes desde el punto de vista industrial y constituyen los caolines y las bentonitas respectivamente.

Todas las arcillas tienen dos estructuras en común pero la disposición de ellas es la diferencia, la figura 2.8 muestra esas estructuras:

- **Un tetraedro de SiO_4 :** Este arreglo semeja una pirámide en la cual un átomo de silicio está ligado con cuatro átomos de oxígeno, el silicio está localizado en el

centro de los cuatro átomos de oxígeno simétricamente colocados en las cuatro esquinas del tetraedro rectangular.

• **Un octaedro de $Al_2(OH)_6$** : consiste en dos hojas, unidad de paquetes oxígeno o hidroxilos en los cuales los átomos del aluminio, hierro o magnesio se encuentran unidos en coordinación octaedral que los mantiene equidistantes se seis oxígenos o hidroxilos.

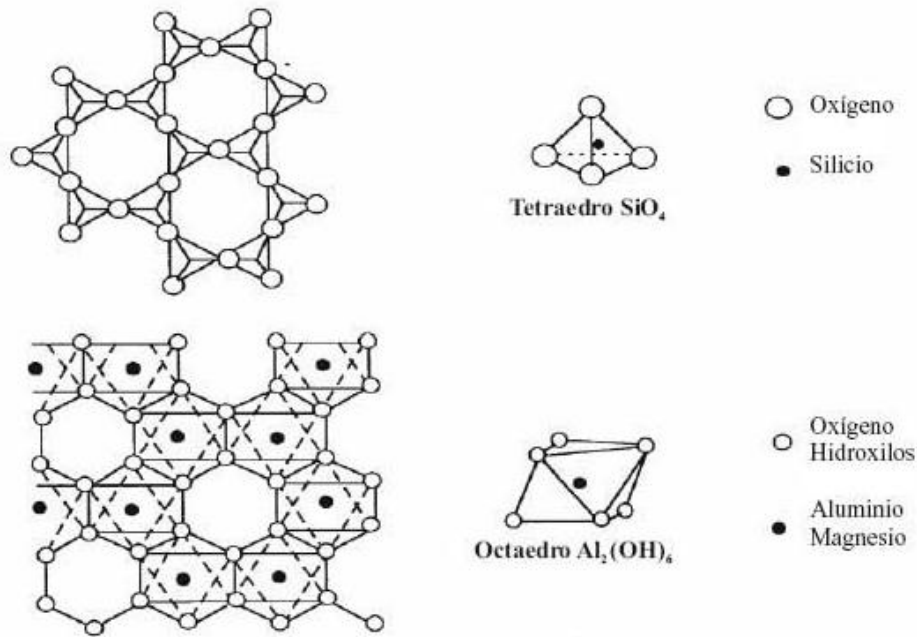


Figura 2.8 Representación esquemática de las capas tetraédricas (superior) y octaédricas (inferior)

Ambas disposiciones se ordenan en forma planar dando lugar al esqueleto de la arcilla. Las láminas de las arcillas pueden estar formadas por dos capas tetraédricas, o por una sola capa tetraédrica, dando lugar a diferentes minerales de arcilla. Sin embargo, estas láminas no se unen entre sí mediante cationes, sino que las láminas se mantienen débilmente unidas mediante fuerzas de atracción generadas por las cargas eléctricas sobrantes de cada lámina. (Véase Figura 2.9) Estas cargas residuales permiten, además, la adhesión de algunos cationes a las superficies interlaminares, que pueden entrar y salir de dicho espacio con facilidad.

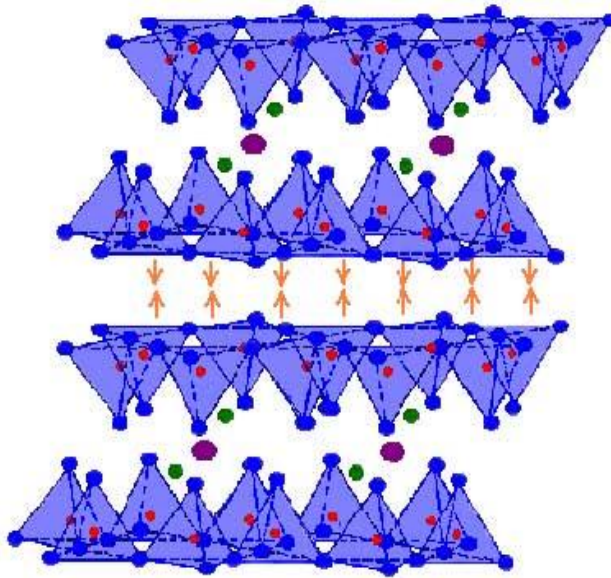


Figura 2.9 Disposición planar de las estructuras para dar una lugar al esqueleto de la arcilla

Los minerales que se han identificado poseen una serie de propiedades peculiares que permiten su utilización en importantes aplicaciones industriales. Estas propiedades derivan de las características estructurales de estos minerales, concretamente de:

- Su pequeñísimo tamaño de partícula.
- Su presentación en láminas débilmente unidas.
- Poseer carga eléctrica residual.

A continuación se describen con un poco más de detalle algunas de sus propiedades más importantes. Cabe destacar que, debido a la diferencia estructural entre los diferentes tipos de arcillas, algunas propiedades son más versátiles en unos minerales que en otros, por lo que en cada tipo de aplicación industrial, unos minerales de arcilla son más deseables que otros.

2.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS ARCILLAS.

Las propiedades fisicoquímicas de un mineral de arcilla particular dependen de su estructura y composición. La estructura y composición principales de las arcillas industriales, es decir, caolines, esmectitas, lutitas y de atapulgita-sepiolita, son muy diferentes, aunque cada uno está compuesto por hojas octaédricas y tetraédricas como sus bloques de construcción básicos. Sin embargo, la disposición y la composición de las hojas octaédricas y tetraédricas representan la mayoría de las diferencias en sus propiedades físicas y químicas.

En la mayoría de las aplicaciones, las arcillas se utilizan debido a las propiedades físicas particulares que contribuyen para el producto final, es decir, caolines para recubrimiento de papel o bentonita en los lodos de perforación. En algunos casos, la arcilla se utiliza por su composición química, es decir, caolín para uso como materia prima para hacerla fibra de vidrio o arcillas y lutitas en la mezcla para hacer cemento.

Las propiedades de mayor importancia para las arcillas existentes en un sistema geotermal se presentan a continuación:

2.4.1 SUPERFICIE ESPECÍFICA

El área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en $\frac{m^2}{g}$.

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

En la Tabla 2.3 se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

Tipo de arcilla	Área superficial
Caolinita de elevada cristalinidad	hasta 15 m ² /g
Caolinita de baja cristalinidad	hasta 50 m ² /g
Ilita	hasta 50m ² /g
Montmorillonita	80-300 m ² /g
Sepiolita	100-240 m ² /g
Paligorskita	100-200 m ² /g

Tabla 2.3 Rango de área superficial de arcillas

Quizás el aspecto más importante de las arcillas a nuestro efecto sea su superficie específica (superficie por unidad de masa que está ligada carácter coloidal de las arcillas).

Una de las propiedades de las partículas coloidales es que estas se mueven dentro de un campo eléctrico, el fenómeno se denomina electroforesis y es común en gases y líquidos. Para explicar el efecto Hemholtz introdujo el concepto de una doble capa eléctrica en la superficie de la arcilla cuando está rodeada de un fluido. Si se imagina una partícula de arcilla (sólido) con un desbalance eléctrico en su estructura (carga negativa) y una nube de cargas positivas provistas por ejemplo por cationes disueltos en el agua que rodea la arcilla. Esta combinación nos lleva a una partícula eléctricamente neutra pero con la “capa” de cationes (iones de carga positiva) capaz de migrar en el agua por difusión debida al flujo de la misma dentro del sistema.

El sistema partícula - nube constituye lo que Hemholtz llamo doble capa eléctrica y este sistema es el causante de gran parte de la conducta de las arcillas en cuanto al daño de formación se refiere.

Aunque los minerales a los cuales las arcillas pueden estar adheridas también presentan cargas eléctricas por desbalances moleculares en el sólido, las uniones con los fluidos son más débiles, los fenómenos de cargas superficiales han sido poco estudiados en rocas.

En todos los sistemas arcilla – agua existen factores que tienden a disociar y otros a asociar las partículas de arcillas. La resultante determina el comportamiento final del sistema, se enuncian los más importantes:

a) FACTORES QUE ASOCIAN

- Fuerzas de Van der Waals.
- Sorción¹ mutua de iones entre capas adyacentes.
- Adsorción de materia orgánica del petróleo

b) FACTORES QUE DISOCIAN

- Hidratación de cationes intercambiados.
- Repulsión de cationes intercambiados.

2.4.2 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de las arcillas se refiere a la capacidad o posibilidad de intercambiar cationes con el medio, esto depende del área superficial y de la carga de la superficie.

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Cuando se sumergen en una solución acuosa, los iones que se encuentran alojados en el espacio interlaminar, así como los iones que se alojan en los huecos situados entre las capas tetraédricas, pueden salir fácilmente del mineral y ser sustituidos por otros existentes en dichas soluciones, se observa en figura 2.10

¹Retención de una sustancia por otra cuando están en contacto; incluye las operaciones de absorción, adsorción, intercambio iónico y diálisis.

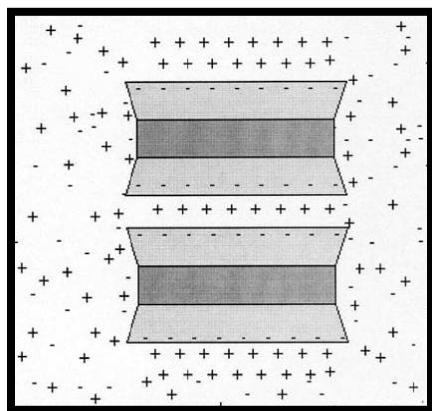


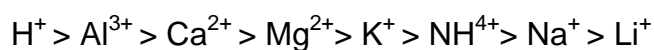
Figura 2.10 Sustituciones en las capas tetraédricas y octaédricas

Por lo tanto, Los cationes de compensación, adsorbidos en la superficie de capas de unidad, pueden ser intercambiados por otros cationes y son conocidos como los cationes intercambiables de la arcilla. La cantidad de cationes por peso de unidad de arcilla es medida y reportada como el CIC. El CIC es expresado en miliequivalentes por 100 g de arcilla seca $\left(\frac{meq}{100g}\right)$. La tabla siguiente presenta el rango de CIC que un tipo de mineral arcillo puede tener.

Mineral	CIC (meq /100 g)
Montmorillonita	80- 150
Illitas	10- 40
Clorita	10- 40
Caolinita	3- 10

Tabla 2.4 Capacidad de Intercambio Catiónico de los minerales de arcilla.

Para tener una idea de cuáles cationes reemplazarán otros cationes en las posiciones de intercambio, lo siguiente es generalmente aceptado y es arreglado en preferencia descendente:



En otras palabras, cualquier catión a la izquierda reemplazará cualquier catión a su derecha. La concentración relativa de cada catión también afecta esta preferencia de intercambio de cationes. Aun cuando el calcio es más difícil de reemplazar que el sodio, si la concentración iónica de Na^+ es significativamente mayor que Ca^{2+} , entonces el sodio desplazará al calcio. El intercambio de catión puede resultar de un cambio en temperatura, ya que muchos componentes tienen diferentes relaciones de solubilidad. Con relación a la temperatura, algunas de las sales de calcio comunes, tales como $CaSO_4$, disminuyen la solubilidad a altas temperaturas, mientras que la mayoría de los componentes de sodio aumentan en solubilidad. En tanto la concentración de $\frac{Na^+}{Ca^{2+}}$ aumenta, hay una tendencia para que el Ca^{2+} en la arcilla sea reemplazada por el Na^+ de la solución.

2.4.3 CAPACIDAD DE ADSORCIÓN

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los adsorbentes ya que pueden adsorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). La capacidad de adsorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad). La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate.

Si la otra sustancia es el agua esta puede alojarse fácilmente en los diferentes huecos de la estructura, así como en el espacio interlaminar. Cuantos más huecos tenga la estructura de la arcilla, mayor será su capacidad de adsorción. La absorción de agua de arcillas adsorbentes es mayor del 100% con respecto al peso. La figura 2.11 ilustra tal efecto.

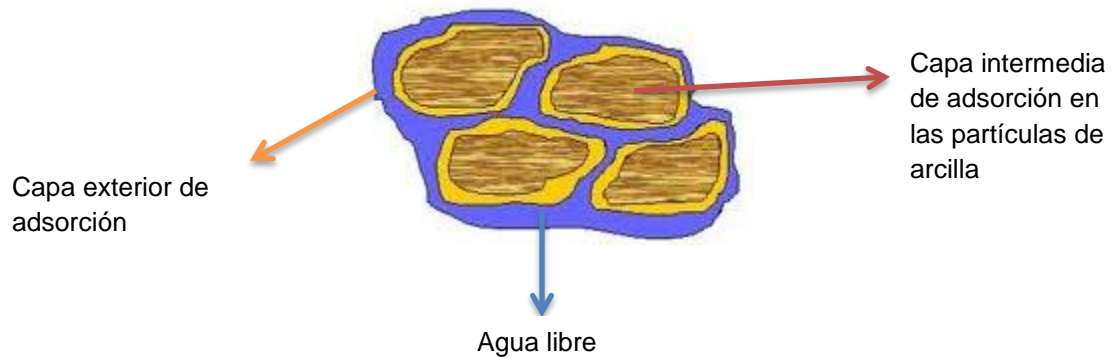


Figura 2.11 Adsorción de agua en un sistema de arcilla- agua.

2.4.4 HIDRATACIÓN E HINCHAMIENTO

El fenómeno de hinchamiento de arcillas es característico de las arcillas esmectitas (Montmorillonita). Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta (Figura 2.12), las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras.

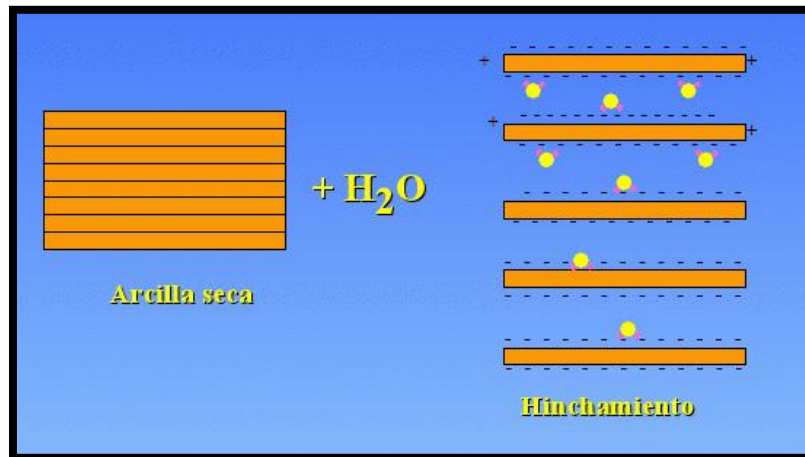


Figura 2.12 Interacción de partículas de arcilla con agua

Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca^{+2} o Mg^{+2} como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

2.4.5 PLASTICIDAD

Las arcillas son eminentemente plásticas, es una de las características físicas más significativas. Esta se define como la capacidad de deformarse sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico conservando la deformación al retirarse la carga (no se produce rebote elástico). En las arcillas depende fundamentalmente del contenido de agua, si está seca no es plástica, se disgrega, y con exceso de agua se separan las láminas (Véase Figura 2.13). Depende también del tamaño de partícula y de la estructura laminar. Cuando esta convenientemente humedecida puede adoptar cualquier forma. Esta propiedad se debe a que el agua forma una “envoltura” sobre las partículas laminares, produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

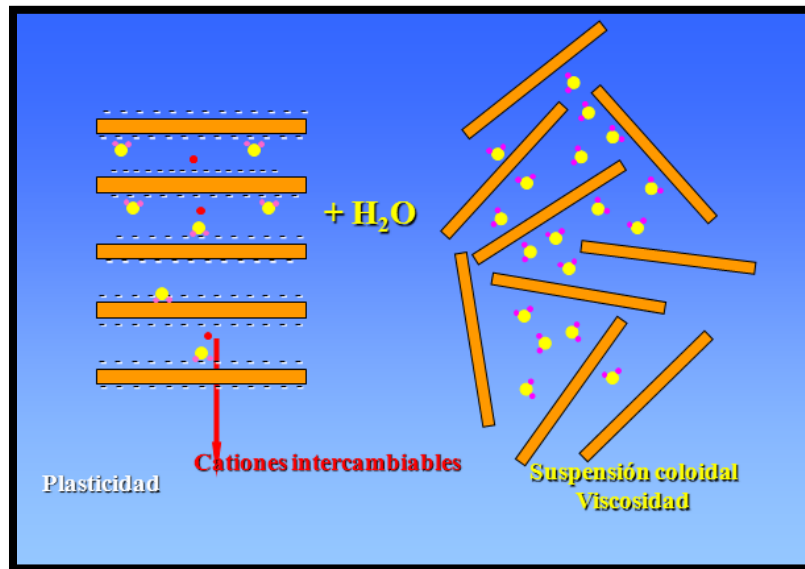


Figura 2.13 Capacidad de arcillas de ser plásticas en presencia de agua.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

También el espesor de la película húmeda dependerá de la separación entre las partículas de arcilla y, en consecuencia, su movilidad. Por eso, cuando el contenido de agua es relativamente elevado, la envoltura acuosa es más gruesa y puede haber flujo viscoso. Por el contrario, si la proporción de agua es baja, las partículas de arcilla se encuentran más próximas y aumenta la cohesión entre ellas. Esto explica que los cationes pequeños sin solvatar, adsorbidos alrededor de una partícula de arcilla, proporcionen una mayor plasticidad que los cationes grandes solvatados.

La viscosidad de la fase líquida también influye sobre la cohesión entre las partículas. Los líquidos muy móviles, de baja viscosidad, no pueden utilizarse para preparar masas plásticas por ser poco adherentes las películas que forman. El agua, al tener una viscosidad moderada, se puede emplear satisfactoriamente.

2.5 TIPO DE ARCILLAS

Las diferentes tipos arcillas fueron formadas a partir de la descomposición de las formaciones rocosas mediante la acción de distintos factores tales como; la presión tectónica, movimientos sísmicos, distintos tipos de erosión, etc., y además por la adquisición, durante el viaje hasta su lugar de sedimentación, de diferentes impurezas de origen mineral; por lo tanto, dependiendo de las características de la roca de origen, existen innumerables tipos de arcillas, cada una de las cuales posee unas propiedades particulares.

El tipo de minerales de arcillas que involucra a los fluidos de perforación se clasifican en tres tipos:

1. Se trata de arcillas en forma de agujas, las cuales no se hinchan, como la atapulgita (figura 2.14) o sepiolita (figura 2.15). Se cree que la forma de las partículas es la responsable en la habilidad de la arcilla para fabricar viscosidad. El tamaño del fino cristal natural y la forma de alguna causan que ésta fabrique una estructura de escobilla en suspensión lo cual ocasiona que esta exhiba una alta estabilidad coloidal aun en presencia de alta concentración de electrolito. Por esta característica, y la falta de hinchazón, estas arcillas presentan un control de filtración muy deficiente. Por esta razón, la atapulgita es principalmente utilizada como un constructor de viscosidad en los lodos de agua salada y la sepiolita se usa más como un viscosificador suplementario para los fluidos geotérmicos de alta temperatura.



Figura 2.14 Atapulgita (izquierda) y una roca Sepiolita (derecha).

2. Es el tipo de arcillas no hinchables (o ligeramente hinchables), con forma de placa; y que son: Illita, clorita y caolinita.
3. En este grupo encontramos a las montmorillonitas altamente hinchables, con forma de placa.

Podemos ver que dada la experiencia se tiene que el segundo y tercer tipo minerales de arcilla son los que se encuentran en las pizarras de formación, pues a medida se va perforando se va encontrando con diversos tipos de minerales, en profundidades someras tenemos la presencia de arcillas como la caolinita y según la profundidad en perforación aparecen las montmorillonitas y mezclas de Illita/esmectita y, cuando llegamos a mayores profundidades se presenta la clorita la cual se caracteriza por ser una arcilla de altas temperaturas. Entonces, se clasifica a las arcillas presentes según el siguiente orden, en cantidades decrecientes:

- 1. Illita**
- 2. Clorita**
- 3. Montmorillonita**
- 4. Caolinita.**

Debido a que las arcillas están presentes en las formaciones perforadas, se encuentran dispersas en el sistema de fluido de perforación en cantidades variables. La montmorillonita en las pizarras es usualmente la montmorillonita de

calcio que está en equilibrio con el agua de formación, la montmorillonita de sodio (bentonita) es también añadida a un lodo para aumentar la viscosidad y reducir la pérdida de fluido.

La filtración y propiedades reológicas del lodo se convierten en una función de las cantidades de varias arcillas ya contenidas en el lodo, para controlar estas propiedades, los otros tipos de arcillas pueden considerarse contaminantes, ya que no son tan efectivas como la arcilla comercial.

Las arcillas son componentes abundantes en el suelo y es de mucha importancia conocer como dichos compuestos y como se manifiestan en alguna de sus formas, sobre todo cuando existe la posibilidad de que sea un material incrustante en materiales y equipos que son de uso en la geotermia como por ejemplo las barrenas.

A continuación se presenta una descripción de los tipos de arcillas que se encuentran presentes en las formaciones perforadas:

2.5.1 ARCILLAS MONTMORILLONITA (ARCILLAS DE TRES CAPAS)

La montmorillonita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxilisilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos.

La tabla 2.6 contiene las propiedades las propiedades generales y fisicoquímicas de la Montmorillonita.


MONTMORILLONITA	CARACTERISTICAS
	<p>Categoría: Minerales filosilicatos Clase: 9.EC.40 (<u>Strunz</u>) Fórmula química : $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$</p>
	<p>Propiedades Físicas</p>
	<p>Color: Gris-blanco, amarillo, marrón, rosa, azulado Raya: Blanca cristalino: Monoclínico Hábito cristalino: Cortezas, masas terrosas, agregados foliares y granulares Dureza: 1-2 Densidad: 1.7-2 g/cm³</p>

Tabla 2.5 Características de la Montmorillonita

La Montmorillonita se caracteriza por una composición química inconstante. Es soluble en ácidos y se expande al contacto con agua. Estructuralmente se compone por una capa central que contiene aluminio y magnesio coordinados octaédricamente en forma de óxidos e hidróxidos. Dicha capa central está rodeada por otras dos capas. Las capas externas están formadas por óxidos de silicio coordinados tetraédricamente.

La propiedad más típica de la montmorillonita es la hinchazón de intercapas (hidratación) con agua. También posee propiedades tixotrópicas, lo que permite su utilización como lodos de perforación.

La montmorillonita de sodio (bentonita) es el constituyente principal de los lodos de perforación de agua dulce, pues ayuda a mantener las propiedades en el fluido de perforación.

La estructura de la montmorillonita se muestra en la siguiente figura.

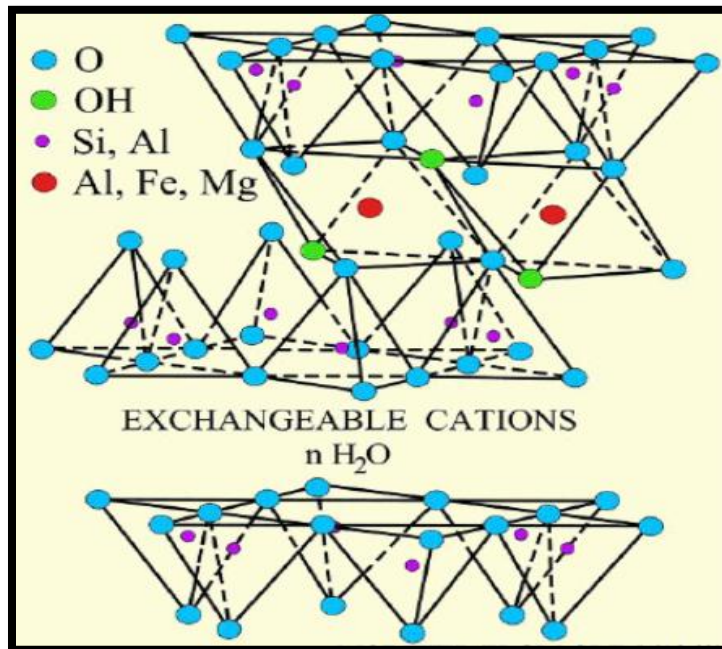


Figura 2.15 Estructura de la Montmorillonita

2.5.2 ILLITAS (ARCILLAS DE TRES CAPAS)

Es una arcilla no expansiva, micácea. La Illita es un filosilicato o silicato laminar. Se produce como agregados de pequeños cristales monoclinicos grises a blancos. Debido a su pequeño tamaño, la identificación certera usualmente requiere análisis de difracción de rayos X. La Illita es un producto de la alteración o meteorización de la moscovita y el feldespato en ambiente de meteorización hídrica y térmica. Es común en sedimentos, suelos, rocas arcillosas sedimentarias, y en roca metamórfica. Se diferencia de la glauconita en sedimentos por análisis de rayos X.

En la siguiente tabla se presentan las características y propiedades de esta arcilla.


ILLITA	GENERAL
	<p>Categoría: Minerales filosilicatos Clase: 9.EC.25 (Strunz) Fórmula química: $(\text{K}\text{H}_3\text{O})(\text{AlMg Fe})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$</p>
	<p>Propiedades Físicas</p>
	<p>Color: Gris-blanco a plateado-blanco, gris verdoso, a veces con otras tonalidades Raya: Blanca cristalino: Monoclínico Fractura : Micácea Dureza: 1-2 Tenacidad: Elástica Densidad: 2.8 g/cm³</p>

Tabla 2.6 Características de la Illita

Estructuralmente la Illita posee la misma estructura básica que las montmorillonitas, pero no muestran hinchazón por intercapas. En lugar de la sustitución de Mg^{2+} por aluminio Al^{3+} , como en la montmorillonita, la Illita tiene una sustitución de Al^{3+} por Si^{4+} dando todavía una carga negativa. Los cationes de compensación son principalmente el ión potasio (K^+). La carga negativa de la estructura cristalina que resulta de estas sustituciones, al compensar los iones de potasio, es usualmente más grande en una y media veces que la de la montmorillonita. La estructura es una capa de 2:1 en la que el catión es intercalado por el ion potasio.

Los minerales de arcilla, esmectita, Illita y capas mezcladas de Illita y esmectita, se encuentra durante la perforación de las formaciones de arcilla y con frecuencia causan varios problemas en la estabilidad de los agujeros y el mantenimiento del fluido de perforación. La naturaleza problemática de estos minerales de arcilla

puede estar relacionada a los cationes de intercapa de enlace débil y débiles cargas de capa que conducen a la hinchazón y dispersión al contacto con agua. Con el aumento de las profundidades de entierro, la esmectita gradualmente se convierte en arcillas de capa mezclada Ilita/esmectita y finalmente Ilita /micca. Como un resultado, las formaciones de pizarras generalmente se vuelven menos hidratables pero más dispersas con el incremento de la profundidad. La estructura característica se presenta en la figura 2.17

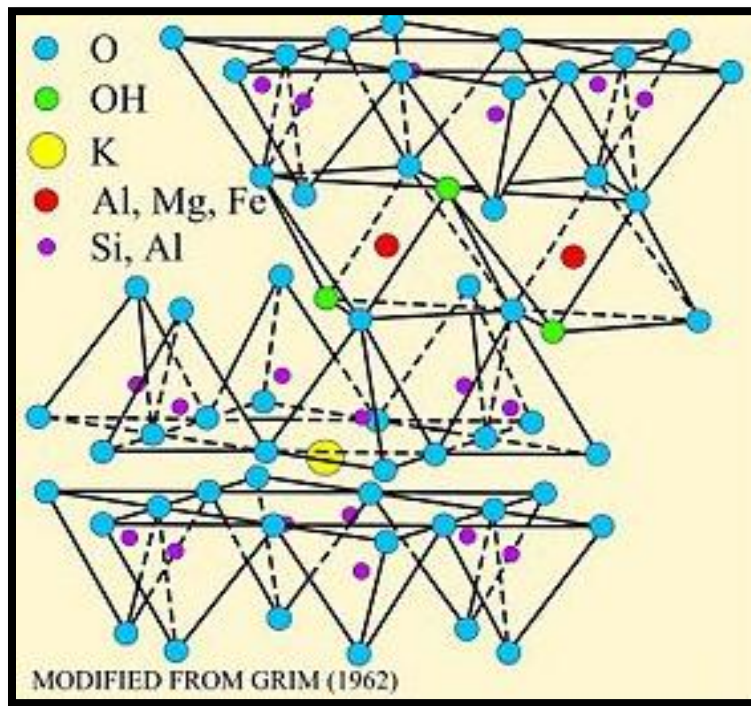


Figura 2.16 Estructura de la Ilita/mica

2.5.3 CLORITAS (ARCILLAS DE TRES CAPAS)

Clorita es el nombre genérico de unos aluminosilicatos, del grupo de los filosilicatos, en algunos de los cuales predomina el hierro, mientras que en otros es más importante la proporción de manganeso y de otros metales.

Son minerales de origen metamórfico que cristalizan en el sistema monoclinico y que se encuentran en forma de láminas flexibles de color verde. Se forman por

transformación y alteración de la augita, la biotita. A continuación se presenta una tabla con las propiedades generales y fisicoquímicas de la Clorita.


CLORITA	GENERAL
	<p>Categoría:Minerales filosilicatos Clase: 9.EC.55 (Strunz) Fórmula química: $(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg,Fe)_3(OH)_6$</p>
	<p style="text-align: center;">Propiedades Físicas</p> <p>Color: Distintos tonos de verde, raramente amarillo, rojo o blanco Raya: Color verde claro a gris Lustre: Vítreo, perlado, sin brillo Sistema cristalino: Monoclínico 2/m, con algunos triclínico polimorfos Hábito cristalino: Masa foliada, agregados escamosos, copos de difusión Exfoliación: Cúbica 001 Fractura: Laminar Dureza: 2 – 2.5 Peso específico: 2.6 – 3.3 Índice de refracción: 1.57 – 1.67</p>

Tabla 2.7 Propiedades Generales y fisicoquímicas de la Clorita.

Las cloritas están estructuralmente relacionadas a las arcillas de tres capas. En su forma pura no se hincharán, pero pueden ser ligeramente inducidas a la hinchazón con alteración. En estas arcillas, los cationes de compensación de carga entre las capas de la unidad tipo montmorillonita son reemplazados por una capa de hidróxido de magnesio octaédrico, brucita. Esta capa tiene una carga neta positiva debido en parte al reemplazo de Mg^{2+} por Al^{3+} en la capa de brucita.

La capacidad de intercambio de catión de las cloritas varía de 10 a 20 $\frac{meq}{100g}$, principalmente debido a los enlaces rotos. La clorita también puede formar esmectita. La arcilla de capa mezclada resultante tendría las propiedades de ambos tipos de arcilla su estructura es la siguiente:

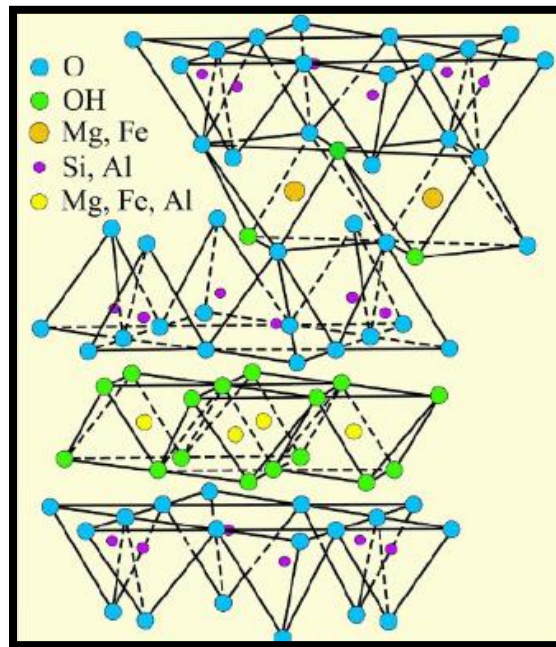


Figura 2.17 Estructura de la clorita

2.5.4 CAOLINITAS (ARCILLAS DE DOS CAPAS)

La caolinita está compuesta por silicato de aluminio hidratado formado por la descomposición de feldespato y otros silicatos de aluminio. Esta descomposición se debe a los efectos prolongados de la erosión. La formación del caolín se debe a la descomposición del feldespato por la acción del agua y del dióxido de carbono. A continuación se presenta una tabla con algunas de las propiedades generales y fisicoquímicas de la Caolinita.

CAOLINITA	GENERAL
	<p>Categoría:Minerales filosilicatos Clase: 9.ED.05 (Strunz) Fórmula química: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$</p>
	<p>Propiedades Físicas</p>
	<p>Color: Blanco Raya: Blanca Lustre: Mate, nacarada cristalino: Triclínico Exfoliación: Perfecta Fractura : Micácea Dureza: 1 Densidad: 2.6 g/cm³</p>

Tabla 2.8 Características generales de la Caolinita

La Caolinita está formada por pequeñas capas hexagonales de superficie plana. En su estructura cristalina se distinguen dos láminas, una formada por tetraedros, en cuyos vértices se situarían los átomos de oxígeno y el centro estaría ocupado por el átomo de silicio, y otra formada por octaedros, en cuyos vértices se situarían los átomos del grupo hidróxido y el oxígeno, y en el centro el átomo de aluminio. Es una arcilla no hinchable que tiene sus capas unidas enlazadas estrechamente juntas por el enlace de hidrogeno. Este evita la expansión de las partículas porque el agua es incapaz de penetrar las capas. La caolinita no contiene cationes de intercapa o cargas de superficie porque hay poco o nada de sustitución en cualesquiera de las láminas octaédricas o tetraédricas. Sin embargo, algunas cargas menores pueden aparecer por enlaces rotos o impurezas. Por tanto, la caolinita tiene una capacidad de intercambio catiónico relativamente baja. La caolinita se encuentra comúnmente como un constituyente de menos a moderado (de 5 a 20%) en las rocas sedimentarias, tales como pizarras o arenisca.

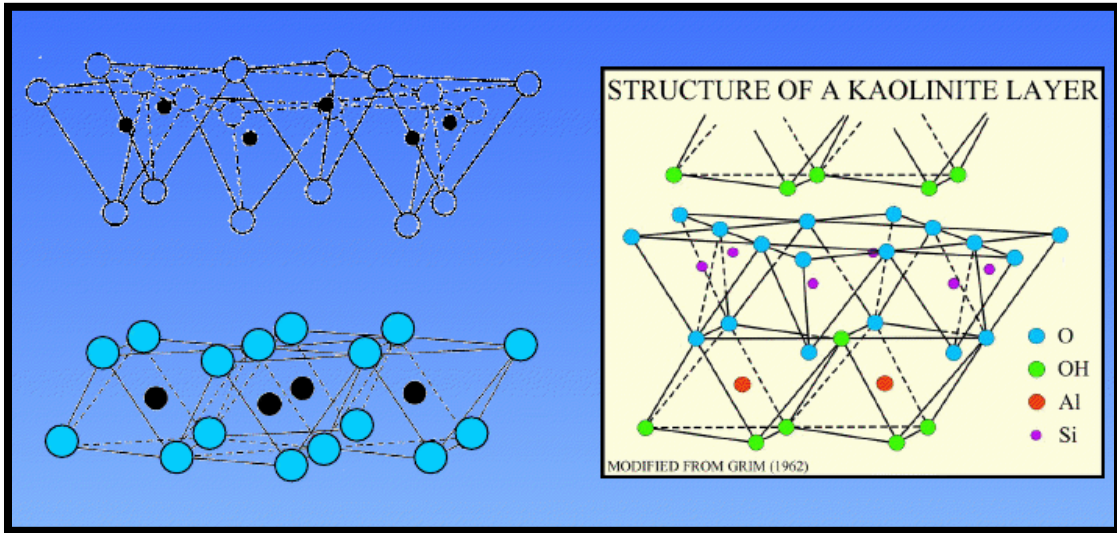


Figura 2.18. Estructura de la Caolinita.

3. FLUIDOS DE PERFORACION

El objetivo esencial al diseñar y construir un pozo, es de obtener el máximo caudal que permitan las características del yacimiento y las condiciones económicas. Se debe considerar que para perforar un pozo antes debe de elaborarse un programa, en el que aparezcan detalladas todas las operaciones a realizarse durante la construcción del pozo y todos los materiales que se emplearan en él, a continuación se presenta una metodología a seguir:

- a) **Nombre y localización del pozo:** se debe incluir las coordenadas del mismo y una referencia longitudinal orientada, con respecto a un nivel de referencia fija.
- b) **Objetivos que se persiguen:** anotar la localización de posibles zonas permeables, la presencia probable de algún contacto estratigráfico, la confirmación de alguna zona de baja resistividad, la presencia de temperaturas de producción de vapor, el conocimiento de las características geoquímicas de los fluidos encontrados, etc.
- c) **Perforación:** se debe mencionar los diámetros y tipos de barrenas y ampliadores, el tipo y características de los lodos y las técnicas de perforación (peso de barrena, revoluciones por minuto en la rotatoria y presión de bombeo), así como las profundidades de cada diámetro, el tamaño y características de las tuberías de ademe a instalar, y los accesorios que se emplearan en las cementaciones, tipo y dosificación del cemento y aditivos, fraguado, etc.
- d) **Muestreo:** indicar la frecuencia en que se tomaran las muestras de canal, así como cantidad, longitud y profundidad de los muestreos de fondos (núcleos). También la frecuencia y periodicidad con que se tomaran las muestras de lodos o agua de perforación para análisis geoquímicos.
- e) **Registros:** mencionar todos los registros que se pretendan tomar así como los intervalos de perforación en los que se realicen.

- f) **Instalaciones superficiales:** indicar la cantidad y las características de cada uno de los componentes, tanto del equipo de control (preventores), como de las conexiones de producción (árbol de válvulas), que se instalen en la cabeza del pozo.
- g) **Pruebas:** anotar todas las pruebas rutinarias o especiales que se pretenden realizar dentro del pozo, así como su duración y características de peso presión que deben tener.
- h) **Diversos:** también deberán aparecer en el programa de perforaciones otros casos especiales de regulación o control que se pretendan, de acuerdo a las condiciones locales existentes en el lugar de la perforación.

Esta metodología es de mucha importancia para planificar la perforación de cualquier pozo, así, cuando se realiza una perforación profunda se considera la posibilidad de emplear algunos sistemas o herramientas que si al principio significan alguna inversión adicional, al final compensan con creces en los resultados obtenidos.

Entonces en perforación la operación del equipo implica la rotación de una barrena por medio de un tubo llamado tubería de perforación, en el cual se hace necesario la utilización de un fluido que circula por su interior, pasa través de la barrena, y regresa a la superficie con el espacio anular (espacio entre el exterior de la tubería de perforación y el interior del agujero o la tubería de revestimiento), arrastrando con él los recortes.

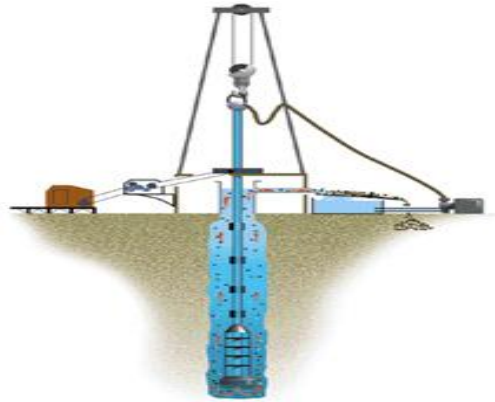


Figura 3.1 Sistema de Circulación del fluido de Perforación

Este fluido de perforación (también llamado lodo de perforación) tiene que reunir ciertas condiciones especiales, para obtener su objetivo principal, que es mejorar las condiciones de perforación. Un esquema simplificado del sistema de circulación del fluido de perforación se muestra en la figura 3.1.

La velocidad, eficiencia, seguridad y economía de la perforación, dependerán principalmente del comportamiento del fluido de perforación usado.

3.1 SISTEMA DE CIRCULACION DE FLUIDOS

Una característica única de la perforación rotatoria es el bombeo del líquido de perforación al fondo del pozo para recoger los cortes hechos por la barrena y levantarlos hasta la superficie. Pero no solo estos recortes son los que se llevan a superficie, al mismo tiempo se levantan las partículas sólidas de las caras del pozo de las formaciones que se van atravesando.

El lodo circula por muchas piezas del equipo, como son la bomba de lodos, la línea de descarga, la columna de alimentación (o tubería vertical), la manguera de lodos, la unión giratoria, y el kelly, la tubería de perforación, los lastra barrenas, la barrena, la espacio anular, la línea de retorno, la zaranda vibratoria, los tanques del lodo, y la línea de succión. (Véase Fig. 3.2).

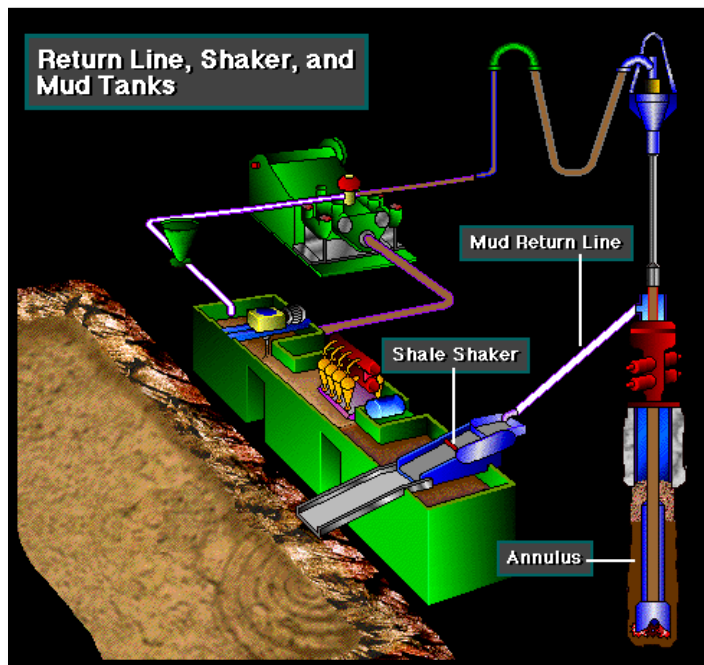


Figura 3.2 Sistema de Circulación de Lodo de Perforación

El lodo es bombeado desde la presa de succión, a través del tubo vertical que es una sección de tubo de acero montado verticalmente en una pata del mástil o de la torre. El lodo es bombeado por el tubo vertical hasta una manguera de lodo, ésta va conectada a la unión giratoria, el lodo entra a la unión giratoria, luego baja por la flecha o kelly, por la tubería de perforación, por el porta barrenas y sale por la barrena. Aquí vira hacia arriba por el espacio anular, (espacio entre la tubería de perforación y la pared del pozo).

Finalmente el lodo sale del pozo a través de un tubo de acero llamada línea de descarga y cae sobre un aparato de tela metálica vibratoria llamada la zaranda vibratoria (Figura 3.3, las fotografías de los equipos utilizadas en el presente capítulo fueron obtenidas, en el equipo Massarenti 6000 de la Perforadora Santa Bárbara, en el pozo TR-18B de Berlín, Usulután, cortesía de la Perforadora Santa Bárbara). La zaranda separa los recortes del lodo y los echa a una presa de desechos y el lodo pasa a la presa de asentamiento, luego a la de mezcla y por fin a la presa de succión para volver a circular el lodo impulsado por la bomba.



Figura 3.3 Criba vibratoria del equipo

También podemos encontrar los desarenadores y los desarcilladores (Figura 3.4) que se conectan a las presas para remover las partículas pequeñas cuando el lodo las trae de la formación ya que si el limo o la arena vuelve a circular por el pozo, el lodo se hace más denso que lo deseado y puede desgastar la sarta de perforación y otros componentes.



a)



b)

Figura 3.4: a) Desarenador y b) desarcillador

Un número de variables en cualquier trabajo de perforación no solamente dictan cuales agentes químicos compondrán el lodo y el carácter físico del mismo, sino también sugieren la mejor velocidad de circulación para el lodo dentro del pozo. El fluido de perforación y los motores de la instalación ayudan a determinar el tipo de barrena que se utilizará y otras de las características que debe tener una instalación de perforación para un trabajo dado.

El lodo se mezcla en las presas de lodo con la ayuda de una tolva dentro de la cual se echan los químicos secos del lodo, estas presas contienen agitadores que mezclan al lodo, dependiendo de las propiedades del lodo que sean necesarias (Figura 3.5).



a)



b)

Figura 3.5 a) Tanque de mezcla de aditivos de los lodos y b) presas con agitadores

Las bombas de lodo es el componente primario de cualquier sistema de circulación de fluidos (Figura 3.6), las cuales funcionan con motores eléctricos conectados directamente a las bombas o con energía transmitida por la central de distribución, las bombas deben ser capaces de mover grandes volúmenes de fluido a presiones altas.



Figura 3.6 Bombas triples de lodo de perforación

3.2 FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Las funciones de los fluidos de perforación se resumen al logro de un completo éxito de un programa de perforación, mediante el control de las propiedades del mismo evitando así problemas en el equipo y por ende atrasos en el proyecto.

Según su importancia a continuación se describen las propiedades de los fluidos de perforación:

3.2.1 ENFRIAR Y LUBRICAR LA BARRENA

Es la herramienta de corte localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación, utilizada para cortar o triturar la formación durante el proceso de la perforación rotaría. Su función es perforar los estratos de la roca mediante el vencimiento de su esfuerzo de compresión y de la rotación de la barrena.

Las barrenas mayormente utilizadas en la perforación de pozos geotérmicos son las barrenas tricónicas que como su nombre lo dice, tiene tres conos cortadores que giran sobre su propio eje. Las toberas en este tipo de barrenas, envían el fluido de perforación a alta velocidad contra el fondo del pozo para remover y levantar los recortes que la barrena va generando durante la perforación.

Durante la perforación se produce considerable calor debido al contacto de la barrena con la formación. El calor producido se transmite al fluido de perforación, el cual, por circulación, es llevado a la superficie, donde se disipa dicho calor. El fluido de perforación también lubrica la barrena y reduce la fricción de la formación con la barrena y con la sarta de perforación. La mayoría de los fluidos de perforación contienen diferentes aditivos (bentonita, polímeros, etc.) que ayudan a reducir la fricción al enfriar y lubricar la barrena (figura 3.7) y la sarta de perforación.



Figura 3.7 Barrena Tricónica

3.2.2 TRANSMISION DE POTENCIA HIDRAULICA A LA BARRENA

El fluido de perforación es el medio a través del cual se transmite la potencia hidráulica a la barrena.

Un fluido cuya viscosidad en la barrena se aproxima a la del agua, disminuirá las pérdidas de presión por fricción y aumentará la potencia hidráulica disponible a la barrena. Esto se debe a que mientras más baja viscosidad tenga un fluido, menos pérdida por fricción en las paredes del pozo tendrá, ya que te será más fácil el movimiento y, por lo tanto, aumentará el rendimiento de la potencia hidráulica disponible.

3.2.3 TRANSPORTE Y ACARREO DE LOS RECORTES A LA SUPERFICIE

Uno de los aspectos principales en la perforación, es la obtención de un óptimo valor de la "Velocidad de Penetración". Para obtenerlo, es esencial el acarreo apropiado de los recortes, de acuerdo con el tipo de barrena, peso, velocidad de rotación y programa hidráulico.

El fluido de perforación deberá proporcionar un flujo adecuado para crear una turbulencia, a través de la barrena, que levante y acarree instantáneamente los recortes perforados; esto se realiza mediante el diseño de un programa hidráulico

adecuado. De otra manera, la velocidad de penetración será reducida, debido al remolimiento de los recortes por la barrena.

El levantamiento de los recortes depende principalmente de las características reológicas del lodo y de su velocidad. El valor del punto de cedencia deberá controlarse, para obtener el óptimo desplazamiento de los recortes a la superficie. En la figura 3.8 pueden verse los recortes a la salida de la criba vibratoria.



Figura 3.8 Recortes a la salida de la criba vibratoria

3.2.4 CONTROL DE LAS PRESIONES DE LA FORMACION

La densidad del fluido de perforación debe ser adecuada para contener cualquier presión de la formación y evitar el flujo de los fluidos de la formación hacia el pozo, además de dar un cierto margen de seguridad mientras se efectúa un viaje de tubería. Sin embargo, la densidad no debe ser tan alta para crear excesivas presiones diferenciales, las cuales disminuirían la velocidad de penetración y podría causar una pérdida de circulación; así como una posible pegada de tubería.

3.2.5 ESTABILIDAD DE LAS PAREDES DEL POZO

Estabilizar las paredes del pozo mientras se perfora a través de formaciones inestables, es una función de gran importancia. Las causas de la inestabilidad en las formaciones pueden ser numerosas y son diferentes en cada área.

Estas causas deben quedar bien definidas, para así poder formular un fluido de perforación con los requerimientos físicos y químicos que permitan evitar el problema- Para asegurar la estabilidad del agujero, el enjarre, la densidad, el flujo y la actividad química del lodo deberán ser ajustados.

3.2.6 AYUDA EN TOMA DE REGISTROS ELECTRICOS

El lodo debe suministrar un medio apropiado para evaluar las formaciones a través de los Registros Eléctricos.

Para tomar los Registros Eléctricos se requiere que el fluido de perforación sea un medio conductor eléctrico, que permita obtener las propiedades eléctricas de los diferentes fluidos de la formación.

La evaluación apropiada de la formación se dificulta enormemente si la fase líquida del fluido de perforación se ha desplazado al interior de la formación, o bien si el fluido altera las propiedades químicas o físicas del agujero.

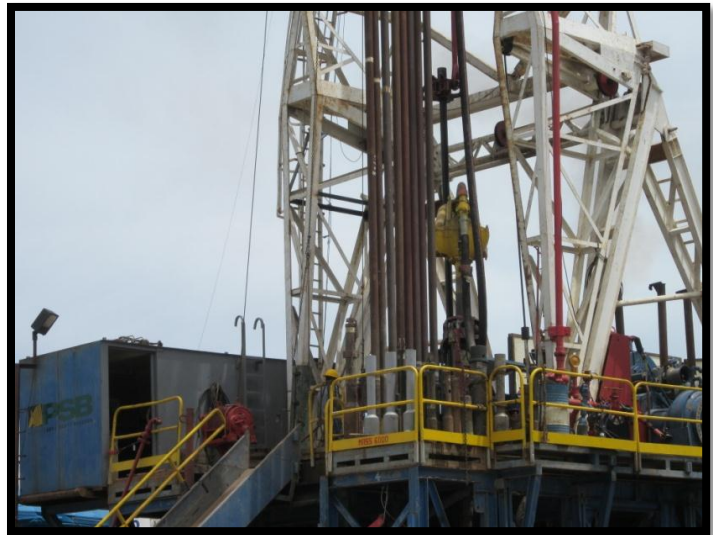
3.2.7 SUSTENTACION DE LA SARTA DE PERFORACION Y DE REVESTIMIENTO

El fluido de perforación tiene, entre otras funciones la de sustentar la sarta de perforación y de revestimiento (figura 3.9). Esto se realiza por medio de un empuje ascendente que obra en la tubería al estar sumergida en el fluido de perforación. Este empuje dependerá de la profundidad a la que se encuentre la tubería y de la densidad del fluido sustentante.

Cuando el fluido considerado es aire, el empuje es casi nulo, por la baja densidad del aire; pero en el caso de un pozo donde la tubería se encuentra sumergida en lodo, el empuje puede ser considerable y se deberá de tomar en cuenta para obtener un análisis real de todas las variables involucradas en el pozo.



a)



b)

Figura 3.1 a) Tubería de Revestimiento y b) Sarta de perforación

3.2.8 SUSPENSION DE LOS RECORTES

La suspensión de los recortes se efectúa principalmente cuando la circulación del fluido es detenido por un tiempo determinado (figura 3.10) durante un viaje de tubería, o por cualquier otra causa. Los recortes que no han sido removidos deberán de quedar suspendidos, ya que si no se efectúa el fenómeno anterior, caerán al fondo y causarán problemas al meter nuevamente la tubería de perforación y al reanudar la perforación, reduciendo la velocidad de perforación al producir un atascamiento de la barrena con los recortes sueltos asentados.

La velocidad de asentamiento de una partícula a través del fluido de perforación, depende de la densidad de la partícula, así como de la densidad, la viscosidad y gelatinosidad o tixotropía del fluido.

La gelatinosidad previene el asentamiento al reducir el grado de caída de las partículas; sin embargo altas gelatinidades requieren altas presiones de bombeo para iniciar la circulación. Debido a esto se deberán programar antes de hacer cualquier operación, las propiedades que convengan para un cierto objetivo. En algunas ocasiones se puede dejar de perforar y circular antes de sacar la tubería

de perforación, a fin de limpiar el agujero de cortes y presumir el asentamiento de éstas durante el viaje de la tubería.



Figura 3.2 a) Recortes de Perforación y b) Lodos de perforación en reposo

3.3 FACTORES DE INFLUENCIA DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN

Estos factores se mencionan a continuación:

3.3.1 VELOCIDAD DE PERFORACION

La velocidad o ritmo de perforación depende principalmente de la selección y mantenimiento apropiados del fluido de perforación. El fluido debe tener propiedades que permitan la mayor velocidad de penetración; por ejemplo: la menor densidad posible, el mínimo contenido de sólidos, y óptimas propiedades de flujo.

3.3.2 LIMPIEZA DEL AGUJERO

Para mantener una apropiada limpieza del agujero, la velocidad anular, el punto de cedencia y la gelatinosidad del fluido de perforación, deben ser mantenidos en los valores apropiados, indicados por las condiciones de la perforación.

3.3.3 ESTABILIDAD DEL AGUJERO

La estabilidad del agujero se afecta principalmente por tres factores externos:

- Erosión mecánica debida a la barrena y al aparejo de perforación.
- Composición química del fluido de perforación
- El tiempo que el agujero permanece descubierto.

La erosión mecánica es producto de la rotación y de los viajes del aparejo de perforación, y no existe modo de eliminarla. La composición química del filtrado se puede modificar, de manera que cause el menor daño posible a las formaciones sensibles al agua. El fluido de perforación se debe diseñar de tal manera que aumente la velocidad de penetración. El lodo debe permanecer el menor tiempo posible en el agujero descubierto.

3.3.4 PROGRAMA DE REVESTIMIENTO

Aunque el programa de revestimiento está principalmente determinado por la profundidad del pozo y la presión de la formación, queda también supeditado al fluido de perforación en zonas donde se encuentren formaciones inestables. Un fluido de perforación, debe ser acondicionado para estabilizar el agujero, de manera que pueda introducirse el revestimiento a mayores profundidades.

Por ejemplo: Al estar perforando una zona de arcillas inestables, hidratables o deleznales, se puede observar la necesidad de usar un revestimiento, para cubrir esta zona, después de haberla perforado. Sin embargo si se usa un fluido estabilizador, para evitar que reaccionen las arcillas, se puede eliminar el uso de una tubería intermedia y así proseguir la perforación hasta la siguiente profundidad de revestimiento.

3.3.5 EVALUACION DE LA FORMACION

El fluido de perforación se debe diseñar de manera que tenga el mínimo efecto sobre la formación productora. Esto permitirá una menor interpretación de las características del yacimiento y del potencial de la zona productora. La mayoría de los fluidos de perforación son, con algunas excepciones, dañinos a la zona productora. Para reducir cualquier daño, es importante que el fluido de perforación

esté en buenas condiciones (bajo contenido de sólidos, composición química apropiada) al perforar la zona productora.

3.3.6 TIEMPO DE PERFORACION TOTAL Y COSTOS DE TERMINACION

La elección de los fluidos de perforación se debe hacer tomando en cuenta el mayor valor de penetración con un agujero estable y el mínimo daño a la formación productora. Los costos diarios y final del lodo no son el factor más importante en la elección del fluido. El objetivo es reducir el número de días en el pozo, a través de una apropiada elección y mantenimiento del Fluido.

3.3.7 SELECCION DEL EQUIPO

Generalmente el equipo empleado, para manejar los fluidos de perforación, se selecciona en forma inapropiada. Muchos equipos perforan ineficientemente debido a un programa de lodo mal escogido y viceversa. Siendo la meta, de un programa de perforación terminar un pozo en el menor tiempo, con el mínimo costo; el equipo escogido debe funcionar apropiadamente con el fluido de perforación. Esto significa que el equipo deberá contar con dispositivos para eliminar sólidos y que proporcionen una adecuada circulación, de manera que los beneficios de un buen programa de lodo puedan realizarse. La elección de un fluido de perforación es una variable importante en la optimización de la perforación, y un buen fluido no se puede mantener y usar sin el equipo apropiado de circulación y de remoción de sólidos, en el equipo de perforación.

3.4 CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN PROGRAMA DE FLUIDOS DE PERFORACION SEGÚN EL TIPO DE FORMACIÓN A PERFORAR

A continuación se presentan los criterios para la selección de fluidos según la formación presentada:

3.4.1 ARCILLAS DELEZNABLES

El problema de las arcillas puede ser menor o muy grave y tiene gran influencia en la selección del fluido de perforación. En situaciones normales, cuando el problema de las arcillas es menor, usualmente la formación oportuna de un buen enjarre controla la arcilla. Si la situación es grave, se debe hacer análisis completo

de la arcilla y se debe elaborar el fluido de perforación específico para controlar o disminuir el problema.

3.4.2 FORMACIONES CON ALTA TEMPERATURA

La estabilidad de los componentes del fluido de perforación se deberá considerar. Cuando la temperatura de fondo sea mayor de 250°F o 120°C. Las altas temperaturas, reducirán la efectividad de los aditivos químicos. Aumentarán las pérdidas de agua y aumentaran la gelatinosidad de los lodos. En general entre más bajo sea el contenido de sólidos perforados, más fácil será mantener las propiedades deseadas a altas temperaturas.

3.4.3 FORMACIONES CON PÉRDIDA DE CIRCULACION

Aunque el tipo de fluido de perforación en uso no tenga un comportamiento directo con la pérdida de circulación, otras complicaciones y costos asociados con las pérdidas de lodo, en una zona particular, tienen influencia directa en la selección del fluido de perforación. Si los costos de obturar una zona de pérdida son muy altos se debe considerar la opción de continuar la perforación ciega y/o meter una tubería de revestimiento, o perforando con aire o espuma si las condiciones lo permiten.

4. REOLOGÍA DE FLUIDOS

Para poder realizar un adecuado diagnóstico del comportamiento reológico de las arcillas naturales del campo geotérmico de Berlín, Usulután es necesario conocer la clasificación de los fluidos según su comportamiento en newtonianos y no newtonianos, además de conocer los diferentes modelos reológicos que describen el comportamiento de las propiedades del lodo de perforación, a partir de las cuales puede inferirse la influencia de las arcillas naturales de la formación incorporadas al mismo durante la perforación de pozos geotérmicos.

Para poder definir la reología de los fluidos es importante tomar algunos conceptos necesarios para su adecuada comprensión, por lo que antes de entrar en el tema será necesario explicarlos.

Se empezará por la velocidad de corte que es La velocidad de rotación en un viscosímetro estándar de campo petrolero en el cual es medido el esfuerzo cortante, y el esfuerzo cortante es la fuerza por unidad de superficie requerida para mover un fluido a una velocidad de corte dada. El esfuerzo cortante se mide en viscosímetros de campos petroleros por la deflexión del dial del medidor a una velocidad de corte, lo que se explicará en el siguiente capítulo sobre las pruebas de laboratorio.

4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

Básicamente los fluidos se clasifican en dos grupos según su comportamiento:

Newtonianos y no Newtonianos. Los fluidos no Newtonianos se dividen en 4 tipos y cada tipo se subdivide de acuerdo con el comportamiento del flujo:

1. Newtonianos
2. No Newtonianos
 - a) De tiempo independiente
 - Plásticos de Bingham
 - Pseudo Plásticos.
 - Dilatantes.
 - b) De tiempo dependiente

- Tixotrópicos
- Reopéctricos

4.2 FLUIDOS NEWTONIANOS.

Los fluidos newtonianos son aquellos cuyo comportamiento de flujo esta descrito por la “Ley de resistencia de viscosidad de Newton”. Esta ley establece que a una temperatura y presión dadas, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Esta constante de proporcionalidad es la viscosidad verdadera de los fluidos Newtonianos.

Matemáticamente:

$$\text{esfuerzo de corte}(\tau) = \text{viscosidad}(\mu) \times \text{velocidad de corte}(\gamma) \quad \text{ec. (4.1)}$$

Donde μ es la pendiente. El gráfico de esta ecuación en papel de coordenadas cartesianas es una línea recta que pasa por el origen (Figura 4.1).

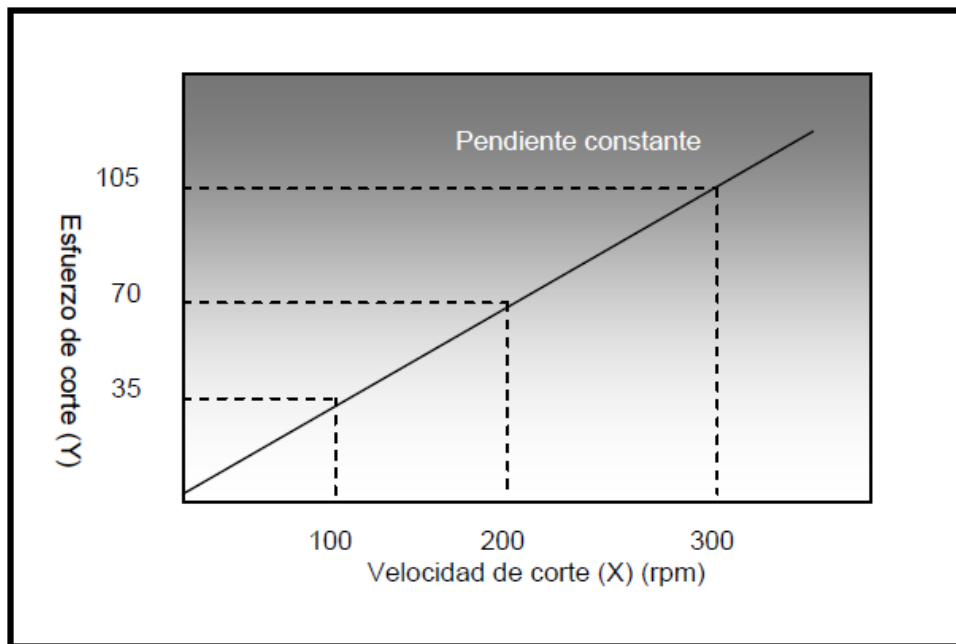


Figura 4.1 Comportamiento de un Fluido Newtonianos

4.3 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Estos fluidos no manifiestan una relación lineal entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte y no pueden representarse por la ecuación de la viscosidad, las cuales se comportan de acuerdo a la “Reología” de cada uno y por lo tanto son clasificados como no Newtonianos. (Véase figura 4.2).

Reología: Es una rama de la ciencia que estudia el flujo y deformación de la materia, particularmente el flujo plástico de los sólidos y el flujo de los líquidos no Newtonianos.

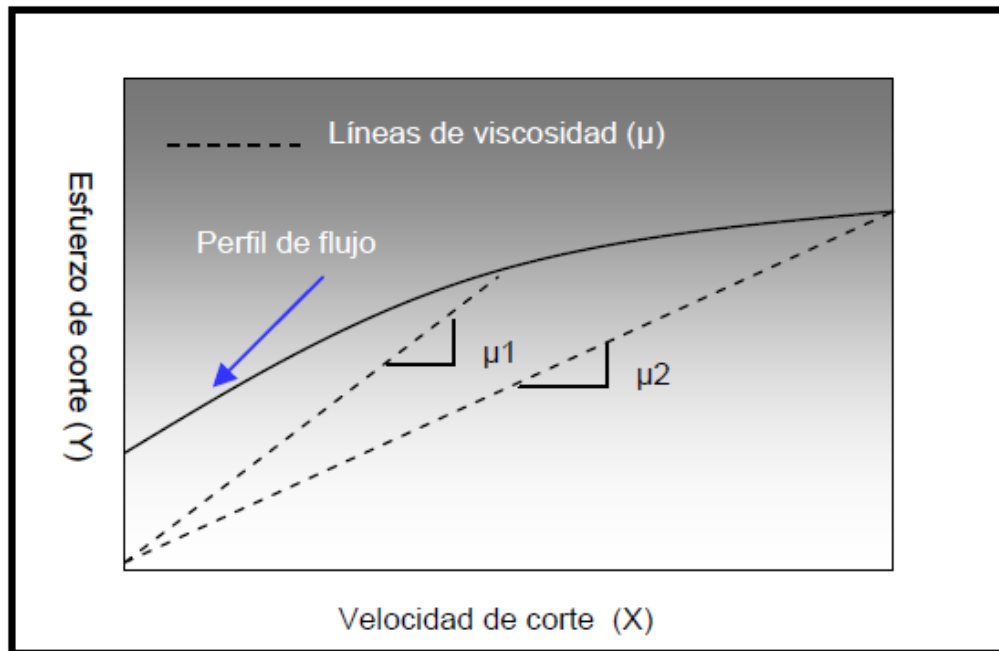


Figura 4.2 Comportamiento de un Fluido No Newtoniano

Los lodos de perforación no son fluidos newtonianos. Por el contrario, son fluidos complejos que presentan una amplia variedad de relaciones esfuerzo de corte-velocidad de corte.

A bajas velocidades de corte, las partículas se enlazan entre sí, aumentando la resistencia al flujo, pero a altas velocidades de corte, los enlaces se rompen.

Bajo estas circunstancias, el esfuerzo de corte no aumenta en proporción directa a la velocidad de corte.

Un fluido no-newtoniano no tiene ninguna viscosidad única o constante que pueda describir su comportamiento de flujo a todas las velocidades de corte.

En la tabla 4.1 se encuentra a clasificación de un fluido no newtoniano según la dependencia con el tiempo.

Tipo de Fluido	Descripción
Independientes del Tiempo	
Fluidos Plásticos de Bingham	Las características de un fluido plástico de Bingham es que la relación velocidad de corte-esfuerzo cortante, es representado por una línea recta; ésta no pasa por el origen y por lo tanto intercepta el eje de los esfuerzos en un punto diferente al origen. La implicación física de este comportamiento es que el fluido Bingham requiere un valor finito del esfuerzo de corte para iniciar el flujo del fluido. Son ejemplos de este tipo de fluido la salsa kétchup, la mostaza, la pintura y la pasta dental.
Pseudo Plásticos	Se produce una disminución de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de deformación. Por lo que no requiere un esfuerzo umbral, es decir, no necesita de un valor finito del esfuerzo de corte para empezar a fluir. Son fluidos pseudoplásticos algunas soluciones polímeras y fluidos de base agua.

Tabla 4.1 Clasificación de un fluido no-newtonianos

Continuación de tabla 4.1

Tipo de Fluido	Descripción
Dilatantes	Se produce un aumento de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de deformación. Tampoco requieren un esfuerzo umbral. Son ejemplos de este tipo de fluido son el almidón o mica en suspensión agua.
De Tiempo Dependiente	
Tixotrópicos	La tixotropía se puede definir como el “fenómeno exhibido por algunos geles que se hacen fluidos con el movimiento, siendo este cambio reversible”. Los fluidos tixotrópicos tienen una estructura interna que aumenta su resistencia al esfuerzo cortante (gelatinosidad) mientras se encuentran en reposo. Ejemplo de este tipo de fluidos son las arcillas cuyas partículas se pueden reunir para formar una matriz o estructura gel, la cual requiere de una fuerza finita para iniciar el flujo.
Reopécticos	Se produce un aumento de la viscosidad al aplicar un esfuerzo cortante y recupera su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. Ejemplo de este tipo de fluidos son algunos lubricantes.

4.4 MODELOS REOLÓGICOS

Los modelos reológicos son una relación matemática que nos permite caracterizar la naturaleza reológica de un fluido, estudiando la deformación dada a una tasa de corte específica.

La reología permite analizar la hidráulica en la perforación rotatoria. Para ello, se utilizan normalmente los modelos “Plástico de Bingham” y “Ley de Potencia”, por lo simple de las ecuaciones de flujo y la facilidad con la que se estiman los parámetros involucrados. A continuación se describe cada uno de ellos.

4.5 MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM.

El modelo plástico de Bingham es el modelo reológico que más se emplea en el campo. Es el modelo más simple para fluidos no newtonianos y, a pesar de ello, provee habitualmente una base excelente para el tratamiento del lodo.

El modelo describe un fluido en el cual se requiere una fuerza finita para iniciar el flujo y que luego demuestra una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta.

La ecuación para el modelo de Flujo Plástico de Bingham es la siguiente:

$$\tau = YP + PV\gamma \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

τ : Esfuerzo de corte.

YP : Punto cedente o esfuerzo de corte a una velocidad de corte de cero.

PV : Viscosidad plástica o tasa de aumento del esfuerzo de corte con el aumento de la velocidad de corte.

γ : Velocidad de corte.

4.6 MODELO DE LEY EXPONENCIAL.

El modelo de Ley Exponencial procura superar las deficiencias del modelo de Flujo Plástico de Bingham a bajas velocidades de corte. El modelo de Ley Exponencial es más complicado que el modelo de Flujo Plástico de Bingham, porque no supone que existe una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

Este modelo describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte aumenta según la velocidad de corte elevada matemáticamente a una potencia determinada.

El modelo de Ley Exponencial se expresa como:

$$\tau = K\gamma^n \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

τ : Esfuerzo de corte

K : Índice de consistencia

γ : Velocidad de corte

n : Índice de Ley Exponencial

El índice “ n ” de Ley Exponencial indica el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido sobre un rango determinado de velocidades de corte. Cuanto más bajo sea el valor de “ n ”, más el fluido disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte sobre dicho rango de velocidades de corte, y más curvada será la relación de esfuerzo de corte/velocidad de corte.

Según el valor de “ n ”, existen tres tipos diferentes de perfiles de flujo y comportamientos del fluido.

- $n < 1$: El fluido es un fluido no newtoniano que disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte.
- $n = 1$: El fluido es un fluido newtoniano.
- $n > 1$: El fluido es un fluido dilatante que aumenta su viscosidad con el esfuerzo de corte (los fluidos de perforación no están incluidos en esta categoría).
- “ K ” es el factor de consistencia del flujo laminar. Se le considera como similar a la viscosidad plástica, dado que un aumento de K indica generalmente un aumento en la concentración de sólidos o una

disminución en el tamaño de las partículas. Los mejores métodos para bajar K son el control mecánico de sólidos y la dilución.

Se muestra en la siguiente figura (figura 4.3) una comparación del comportamiento de los modelos reológicos citados anteriormente.

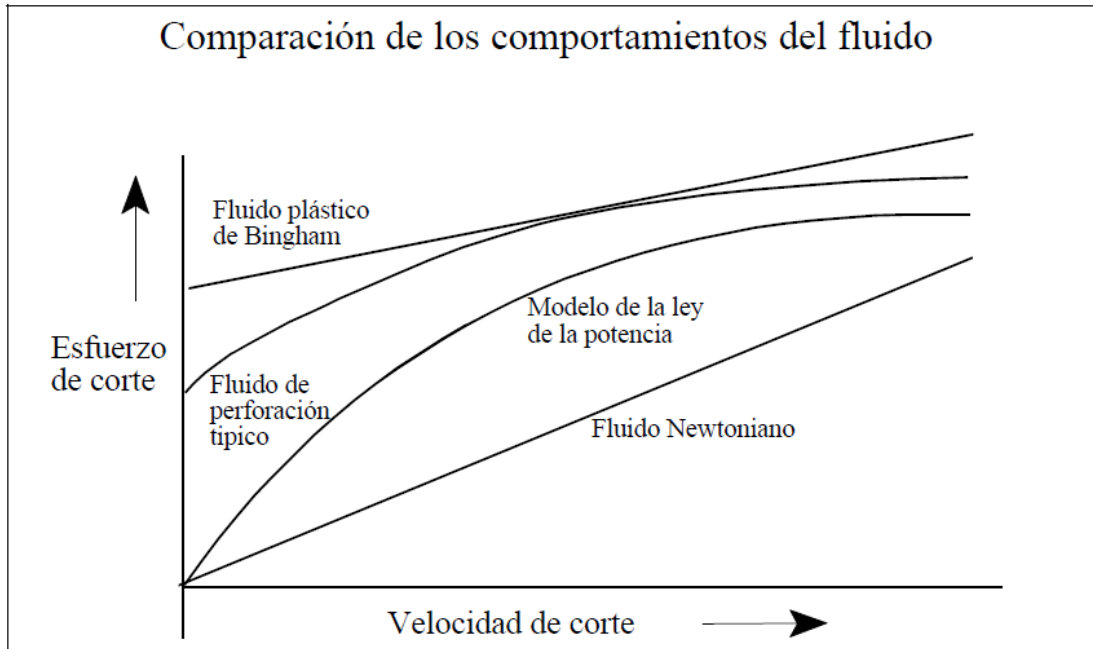


Figura 4.3 Comparación de los Comportamientos del Fluido

5. PRUEBAS DE LABORATORIO

Cuando no se cuenta con un total conocimiento de la geología de una zona, en la cual se establecen operaciones de perforación y cementación del pozo, se tiene una alta probabilidad de presentar una gran cantidad de problemas operacionales, ya que las condiciones del fluido o lodo utilizado están sensibles a algunos factores externos, que pueden modificar sus propiedades fisicoquímicas, es decir, cuando en un lodo existe la presencia de cualquier sustancia extraña que puede tener efectos nocivos sobre sus propiedades, tal es el caso de la contaminación del fluido de perforación con arcillas que se encuentran a medida se va perforando, estas son arcillas de formación que contaminan el lodo causando que las propiedades físicas del mismo se vean afectadas por el contaminante, cabe destacar que estos son parámetros que deben ser controlados al momento de perforar para hacer el trabajo mucho más efectivo y seguro.

Por lo tanto, para llevar un control en el proceso de perforación es necesario tomar ciertas muestras de los fluidos de perforación, estas nos indicaran las condiciones del reservorio o facie que se va perforando. Para la realización de las pruebas de laboratorio las muestras de los lodos de perforación se programan 3 al día, una por la mañana, en la tarde y la última por la noche se recolectan en la línea de flujo o en la presa de succión y se les realizan las pruebas que se presentan en detalle. Fig. 5.1



Figura 5.1 Recolección de muestras en presa de succión (Fotografía en el Equipo Massarenti 6000 en Berlín, Usulután cortesía de PSB)

5.1 PRUEBAS FISICOQUIMICAS

Los análisis necesarios son:

5.1.1 PRUEBA DE DENSIDAD

La densidad es una propiedad expresada en términos de la masa sobre unidad de volumen, idealmente, se desea que el lodo tenga una densidad tan baja como la del agua, para lograr óptimas velocidades de penetración y disminuir las pérdidas de circulación. Sin embargo un lodo con densidad dos veces y media más de la del agua podrá ser necesario para prevenir y controlar un derrumbe ocasionado por formaciones.

Por regla general, para obtener con seguridad la óptima velocidad de penetración, la densidad del lodo deberá mantenerse a un valor mínimo, que equilibrará la presión de la formación y suministrará un leve sobre balance, para dar seguridad contra sondeos del pozo durante viajes y conexiones de tuberías.

Son excepciones para esta regla cuando se está perforando en un área con baja permeabilidad y formaciones sobre presionadas o en áreas donde formaciones plásticas o hidratables tienden a cerrarse sobre el agujero que está siendo perforado. En el primer caso la solución sería perforar usando un preventor rotatorio en la superficie, para controlar el flujo de la formación. En el segundo caso, además de ajustar otras propiedades del lodo se aumenta su densidad para evitar los derrumbes de las formaciones.

5.1.2 PRUEBA DE pH

El factor pH es la medida de la acidez o la alcalinidad de una solución electrolítica.

El factor pH tiene valores que varían de 1 a 14.

Una solución neutra (agua destilada) tiene $\text{pH} = 7$.

La disminución del pH de 7 a 1 indica un grado de acidez y el aumento del pH de 7 a 14 indica un grado de alcalinidad.

El valor propio del pH para un fluido de perforación depende del tipo de fluido. Por ejemplo el pH de lodos de bajo contenido de sólidos no dispersos debe mantenerse entre 7 y 9, valores más altos perjudican la efectividad de los polímeros. Por otro lado sistemas de lodo dispersos requieren valores de pH de 9 a 10.5.

Para obtener un pH estable y duradero, los reactivos químicos, sosa cáustica o hidróxido de potasio, deben agregarse despacio y por períodos de tiempo prolongados.

5.1.3 PRUEBA DE AZUL DE METILENO

La prueba de azul de metileno (MBT) es una prueba para determinar la cantidad de sólidos reactivos (sólidos bentónicos) en el fluido de perforación, basado en la capacidad de cambio de cationes de estas partículas sólidas. En esta prueba, el material orgánico presente en la muestra de lodo es primeramente oxidado y una cantidad de azul de metileno es agregado para teñir, y agitando vigorosamente, permite que las partículas bentónicas que permanecen en la muestra se tiñan. Cuando la presencia de color libre en la muestra es detectado y se suspende la adición, basándonos en este punto (volumen de tinte absorbido por partículas), que es la capacidad de absorción de las partículas bentónicas y conocido el volumen de la muestra, la concentración de partículas bentónicas es calculada en función de la concentración de equivalente de bentonita en $\frac{lb}{barril}$.

5.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS

El análisis químico del lodo de perforación y del filtrado del lodo, debe hacerse como rutina para determinar la presencia y concentración de varios iones. Dichas pruebas son necesarias para detectar el nivel de electrolitos que afectan los sólidos reactivos (bentonita) en el fluido y también las propiedades del fluido.

Como objeto de evitar daños a la perforación, hidratación de alguna lutita, problema o lavar secciones saladas, es importante formular y controlar la

composición de los filtrados del lodo para la compatibilidad e inhibición de las formaciones que se van perforando.

VISCOSIDAD DEL LODO.

Cualitativamente, la viscosidad se define como "La resistencia interna de un fluido a fluir". Sin embargo sólo los fluidos Newtonianos como el agua, cuyas características de flujo tienen una viscosidad verdadera, pueden definirse por un solo término. Todos los fluidos no-Newtonianos, incluyendo a los lodos de perforación, tienen características de flujo no lineales y requieren de más de un término de viscosidad para definir su comportamiento viscoso.

La viscosidad de un fluido de perforación puede expresarse en medidas relativas o absolutas. Las medidas relativas son la viscosidad del embudo o viscosidad aparente. Las medidas absolutas son valores de las características no newtonianas, como la viscosidad plástica, el valor de cedencia y esfuerzo de corte. Un fluido de perforación tendrá diferentes propiedades viscosas al circular por diferentes partes del sistema. Las propiedades de viscosidad deseada para un fluido de perforación son: proporcionar a este la facilidad de impartir una óptima potencia hidráulica en la barrena; debe tener suficiente "viscosidad efectiva" en el espacio anular para mantener el agujero limpio, la viscosidad efectiva es La viscosidad usada para describir el fluido que fluye a través de una geometría particular; al cambiar las geometrías del pozo, también cambia su viscosidad efectiva; además el fluido de perforación, debe de tener suficiente baja "viscosidad efectiva" para que el fluido se desprenda de los cortes al llegar a la superficie; y por último, tener suficiente gelatinosidad para mantener los recortes y el material pesado en suspensión cuando el fluido no está en movimiento.

En cualquier sistema de fluidos de perforación estas propiedades deben de analizarse y elegir los valores más adecuados para cada caso.

a) MEDIDA DE LA VISCOSIDAD EN EMBUDO DE MARSH

Esta medición se efectúa comparando el tiempo de escurrimiento del lodo con el del agua. El embudo es un instrumento calibrado con una capacidad de 1500 cc, con una perforación en la parte inferior para la descarga. Un litro de agua se descarga en 28 segundos y el tiempo requerido para que escurra un litro de lodo da una indicación de su viscosidad. El único beneficio que se obtiene al usar este método de medición es detectar los cambios en las propiedades del lodo, que pueden ser indicativas de los posibles problemas del pozo.

b) VISCOSIDAD PLÁSTICA, VALOR DE CEDENCIA, Y ESFUERZO GEL

En el campo, las propiedades del flujo (viscosidad plástica, valor de cedencia, y esfuerzo gel) de un lodo de perforación, se miden usando un viscosímetro de velocidad variable; el de uso común es el viscosímetro Fann V-G, modelo 35, de dos velocidades, 12 volts. También se usa el Reómetro Baroid de dos velocidades, movido a mano.

- Viscosidad Plástica (PV): Es la contribución a la viscosidad del fluido de un fluido bajo condiciones dinámicas de flujo. La viscosidad plástica está generalmente relacionada con el tamaño, forma y número de las partículas de un fluido en movimiento.
- Punto Cedente (YP): Es la fuerza requerida para iniciar el flujo; el punto cedente, es una medida independiente del tiempo y generalmente está asociado con el modelo de Bingham.
- Esfuerzo de Gel: Mediciones del esfuerzo cortante de un fluido dependientes del tiempo bajo condiciones del gel estáticas.

5.3 PRUEBA DE ENJARRE

Entre las propiedades principales del fluido de perforación tenemos el mantenimiento de la permeabilidad en el enjarre, así como del filtrado lo más bajo posible para tener una buena estabilidad del agujero y disminuir la invasión del filtrado y el daño en los horizontes potencialmente productores.

Para la formación del enjarre, el lodo debe contener algunas partículas de un tamaño pequeño, para el cierre de los poros de la formación. Existen dos tipos de filtración del lodo:

- Estática.- Es la de menor filtrado.
- Dinámica.- Depende de la velocidad de erosión del enjarre o la velocidad de generar esto durante la perforación.

Los factores que afectan la pérdida de agua son:

- La temperatura.- al aumentar la temperatura aumenta la pérdida de agua y por lo tanto disminuye la viscosidad.
- El tipo y tamaño de las partículas.- al aumentar el número de partículas coloidales por lo tanto disminuye la permeabilidad del enjarre y lo que se necesitan son enjarres con mayor permeabilidad.
- El tiempo expresado como:

$$Q = CT + \text{Pérdida inicial}$$

Donde:

Q = volumen del filtrado.

T = tiempo.

C = constante, que depende de las unidades utilizadas.

- La presión, que depende de la compresibilidad del enjarre, que pueden ser:
 - ✓ Enjarres Compresibles, se volverán compactos a medida que la presión diferencial aumenta, ocasionando una reducción de la permeabilidad del enjarre y a su vez disminuye el valor de la filtración a través del enjarre.
 - ✓ Enjarres Incompresibles, pasan por insignificante la reducción de la permeabilidad con incrementos de la presión diferencial, por lo tanto la pérdida de fluido se incrementará con el incremento de la presión diferencial.

Los equipos para medir las pérdidas de agua y el enjarre son el modelo Baroid filtro prensa API a baja temperatura y el modelo FANN filtro prensa API baja temperatura.

5.4 CONTENIDO DE ARENA

Arena contenida en un fluido de perforación es medida en por ciento de partículas de arena que son retenidas en una malla No. 200. Esta medida dará una indicación para el tratamiento que se dará al fluido de perforación y nos hará una evaluación de la eficiencia del equipo de control sólidos y el procedimiento de su operación. Esta medida es hecha con muestras de lodo tomadas en la línea de flujo o en la prensa de succión dando el porcentaje de partículas de arena que circulan a la superficie y sirviendo para controlar la efectividad de la remoción de sólidos.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

En el este capítulo se hace el análisis comparativo de los resultados obtenidos, es importante tener en cuenta que el análisis mencionado para cada curva se hace con respecto a la curva experimental. De las pruebas descritas anteriormente se obtiene una base de datos, las cuales son sometidas a diferentes análisis que se describen a continuación.

Tomando como base los reogramas y las tendencias obtenidas en base a las tasas de corte; se puede decir que existe un modelo que genera una mejor representación del fluido según el rango de tasas manejadas. Es decir, a altas 200 rpm a 600 rpm, el modelo óptimo para este lodo es el modelo plástico de Bingham y a bajas tasas 3 rpm a 100 rpm el modelo de potencia.

6.1 RESULTADO DE LAS PRUEBAS REOLOGICAS

La tabla 1 muestra las lecturas directas del reómetro Fann a las diferentes velocidades para cada muestra de lodo, estas lecturas se llevan a una equivalencia a segundos⁻¹ para comparar entre los modelos reológicos y realizar los respectivos cálculos. Los datos presentes corresponden a la primera semana de muestreo y siguiendo las ecuaciones de la pruebas reológicas (véase 4.3.2) se obtiene:

El ejemplo de cálculo para cada parámetro del primer día es:

- Viscosidad plástica (PV)

$$PV, cP = 2600 - 2300 \text{ rpm} \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$PV, cP = 66 - 46 = 20$$

- Punto cedente (YP)

$$YP, \frac{lbf}{100ft^2} = 2300 \text{ rpm} - PV \quad \text{Ec.6.2}$$

$$YP, \frac{lbf}{100ft^2} = 46 - 20 = 26$$

- Velocidad de corte:

$$\gamma, \left(\frac{1}{seg}\right) = RPM \times 1.703 \quad \text{Ec. 6.3}$$

$$\gamma, \left(\frac{1}{seg}\right) = 600 \times 1.703 = 1021.80$$

- Esfuerzo de corte experimental:

$$\tau, \frac{lbf}{100ft^2} = \theta \times 1.0678 \quad \text{Ec. 6.4}$$

$$\tau, \frac{lbf}{100ft^2} = 66 \times 1.0678 = 70.47$$

Estos cálculos se realizan para cada base de datos de cada semana de muestreo y se presentan la tabla 6.1 que corresponde a la primera semana, los demás datos se encuentran en el anexo 2

DATOS REOLOGICOS DE FLUIDOS DE PERFORACION: SEMANA 1						
Día	Velocidad de corte γ (RPM)	Velocidad de corte γ ($\frac{1}{Seg}$)	Lectura del reómetro (θ)	Lectura de Esfuerzo cortante τ	Punto de cedencia YP ($\frac{Lbf}{100ft^2}$)	Viscosidad Plástica μ_p (Cps)
1	600	1021.80	66	70.47	26	20
	300	510.90	46	49.12	26	20
	200	340.60	37	39.51	26	20
	100	170.30	27	28.83	26	20
	3	5.11	10	10.68	26	20
	0	0	10	10.68	26	20
2	600	1021.80	65	69.41	35	15
	300	510.90	50	53.39	35	15
	200	340.60	37	39.51	35	15
	100	170.30	27	28.83	35	15
	3	5.11	10	10.68	35	15
	0	0	10	10.68	35	15

Tabla 6.1 Lecturas de reómetro de Fann correspondientes a la semana 1 de muestreo de lodo de perforación.

Continuación de tabla 6.1: Lecturas de reómetro de Fann correspondiente a la primera semana

Día	Velocidad de corte γ (<i>RPM</i>)	Velocidad de corte γ ($\frac{1}{Seg}$)	Lectura del reómetro (θ)	Lectura de Esfuerzo cortante τ	Punto de cedencia YP ($\frac{Lbf}{100ft^2}$)	Viscosidad Plástica μ_p (<i>Cps</i>)
3	600	1021.80	44	46.98	16	14
	300	510.90	30	32.03	16	14
	200	340.60	29	30.97	16	14
	100	170.30	22	23.49	16	14
	3	5.11	15	16.02	16	14
4	600	1021.80	40	42.71	16	12
	300	510.90	28	29.90	16	12
	200	340.60	24	25.63	16	12
	100	170.30	20	21.36	16	12
	3	5.11	5	5.34	16	12
	0	0	6	6.41	16	12
5	600	1021.80	65	69.41	25	20
	300	510.90	45	48.05	25	20
	200	340.60	34	36.31	25	20
	100	170.30	23	24.56	25	20
	3	5.11	4	4.27	25	20
	0	0	7	7.47	25	20
6	600	1021.80	29	30.97	9	10
	300	510.90	19	20.29	9	10
	200	340.60	14	14.95	9	10
	100	170.30	8	8.54	9	10
	3	5.11	2	2.14	9	10
	0	0	2	2.14	9	10
7	600	1021.80	4	42.71	12	14
	300	510.90	26	27.76	12	14
	200	340.60	22	23.49	12	14
	100	170.30	18	19.22	12	14
	3	5.11	9	9.61	12	14

Entonces para realizar la comparación de modelos reológicos se hace en base a valores promedio, de tal forma que se genera un consolidado por semana. A continuación se presentan los datos correspondientes a las siete semanas de estudio donde se muestra la variación de los parámetros de viscosidad plástica, punto de cedencia, velocidad de corte y esfuerzo cortante, este último calculado por el modelo reológico de Bingham y al proceder con el modelo de la ley exponencial.

Las ecuaciones correspondientes a cada modelo se encuentran en el capítulo anterior (véase la sección 4.3), el ejemplo de cálculo para la primera semana es el siguiente:

- Modelo de Bingham

$$\tau = \mu_p \times \gamma + YP \quad \text{Ec. 6.5}$$

$$\tau = 0.03 \times 1021.80 + 21.17 = 55.71 \frac{\text{lb}f}{\text{ft}^2}$$

- Modelo Exponencial

$$\tau = K\gamma^n \quad \text{Ec.6.6}$$

Se calcula el índice de ley exponencial

$$n = \frac{\log\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\log\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)} \quad \text{Ec. 6.7}$$

Donde:

τ_1, τ_2 ; Representa los esfuerzos de corte a las diferentes velocidades de corte.

γ_1, γ_2 ; Representa las velocidades de corte a las que se realizaron las pruebas.

Entonces, evaluando la ecuación 6.12 se obtiene:

$$n = \frac{\log\left(\frac{33.44}{55.71}\right)}{\log\left(\frac{510.90}{1021.80}\right)} = 0.50$$

El cálculo del índice de consistencia o índice de fluido:

$$K = \frac{\tau}{\gamma^n} \quad \text{Ec. 6.8}$$

$$K = \frac{38.44}{510.90^{0.50}} = 1.68$$

Por lo tanto el esfuerzo cortante es:

$$\tau = K\gamma^n \quad \text{Ec. 6.9}$$

$$\tau = 1.6 \times 1021.80^{0.50} = 54.99 \frac{lbf}{ft^2}$$

Siguiendo la misma metodología se evalúan los parámetros de las ecuaciones de los modelos reológicos para cada semana y se obtiene las siguientes tablas de datos formando así un consolidado de datos:

Velocidad de corte γ $\left(\frac{1}{seg}\right)$	Lectura esfuerzo cortante τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Esfuerzo cortante de Bingham τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Índice de ley exponencial (n)	Índice de flujo K (Cps)	Esfuerzo cortante Exponencial τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Viscosidad μ_p $\left(\frac{lbf.seg}{ft^2}\right)$	Punto de cedencia YP $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$
1021.8	54.99	55.71	0.50	1.68	54.99	0.03	21.17
510.9	38.80	38.44	0.54	1.32	38.80	0.03	21.17
340.6	31.14	32.68	0.46	2.10	31.14	0.03	21.17
170.3	22.60	26.92	0.29	5.10	22.60	0.03	21.17
5.1	8.19	21.34	-	-	-	0.03	21.17

Tabla 6.2 Consolidado de la primera semana con los resultados de los modelos de Bingham y de Potencia

Velocidad de corte γ $\left(\frac{1}{seg}\right)$	Lectura esfuerzo cortante τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Esfuerzo cortante de Bingham τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Índice de ley exponencial (n)	Índice de flujo K (Cps)	Esfuerzo cortante Exponencial τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Viscosidad μ_p $\left(\frac{lbf.seg}{ft^2}\right)$	Punto de cedencia YP $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$
1021.80	48.66	49.54	0.54	1.13	48.66	0.03	17
510.90	33.41	33.27	0.53	1.26	33.41	0.03	17
340.60	27.00	27.85	0.50	1.45	27.00	0.03	17
170.30	19.07	22.42	0.36	2.95	19.07	0.03	17
5.11	5.34	17.16	-	-	-	0.03	17

Tabla 6.3 Consolidado de la segunda semana con los resultados de los modelos de Bingham y de Potencia

Velocidad de corte γ $\left(\frac{1}{seg}\right)$	Lectura esfuerzo cortante τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Esfuerzo cortante de Bingham τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Índice de ley exponencial (n)	Índice de flujo K (Cps)	Esfuerzo cortante Exponencial τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Viscosidad μ_p $\left(\frac{lbf.seg}{ft^2}\right)$	Punto de cedencia YP $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$
1021.80	49.42	50.65	0.60	0.78	49.42	0.04	14.86
510.90	32.64	32.76	0.66	0.54	32.64	0.04	14.86
340.60	25.02	26.79	0.66	0.54	25.02	0.04	14.86
170.30	15.86	20.83	0.48	1.37	15.86	0.04	14.86
5.11	2.97	15.04	-	-	-	0.04	14.86

Tabla 6.4 Consolidado de la tercera semana con los resultados de los modelos de Bingham y de Potencia

Velocidad de corte γ $\left(\frac{1}{seg}\right)$	Lectura esfuerzo cortante τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Esfuerzo cortante de Bingham τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Índice de ley exponencial (n)	Índice de flujo K (Cps)	Esfuerzo cortante Exponencial τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Viscosidad μ_p $\left(\frac{lbf.seg}{ft^2}\right)$	Punto de cedencia YP $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$
1021.80	59.80	61.21	0.59	1.02	59.80	0.04	18.50
510.90	39.78	36.40	0.60	0.97	39.78	0.04	18.50
340.60	31.23	30.43	0.57	1.15	31.23	0.04	18.50
170.30	21.09	24.47	0.39	2.82	21.09	0.04	18.50
5.11	5.34	18.68	-	-	-	0.04	18.50

Tabla 6.5 Consolidado de la cuarta semana con los resultados de los modelos de Bingham y de Potencia

Velocidad de corte γ $\left(\frac{1}{seg}\right)$	Lectura esfuerzo cortante τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Esfuerzo cortante de Bingham τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Índice de ley exponencial (n)	Índice de flujo K (Cps)	Esfuerzo cortante Exponencial τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Viscosidad μ_p $\left(\frac{lbf.seg}{ft^2}\right)$	Punto de cedencia YP $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$
1021.80	63.15	64.66	0.59	1.06	63.15	0.04	19.43
510.90	41.95	37.33	0.54	1.45	41.95	0.04	19.43
340.60	33.71	31.36	0.55	1.37	33.71	0.04	19.43
170.30	23.03	25.39	0.41	2.76	23.03	0.04	19.43
5.11	5.42	19.61	-	-	-	0.04	19.43

Tabla 6.6 Consolidado de la quinta semana con los resultados de los modelos de Bingham y de Potencia

Velocidad de corte γ $\left(\frac{1}{seg}\right)$	Lectura esfuerzo cortante τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Esfuerzo cortante de Bingham τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Índice de ley exponencial (n)	Índice de flujo K (Cps)	Esfuerzo cortante Exponencial τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Viscosidad μ_p $\left(\frac{lbf.seg}{ft^2}\right)$	Punto de cedencia YP $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$
1021.80	48.20	49.43	0.60	0.74	48.20	0.03	14.29
510.90	31,3	31.86	0.59	0.82	31.73	0.03	14.29
340.60	25.02	26.00	0.59	0.81	25.02	0.03	14.29
170.30	16.63	20.14	0.43	1.81	16.63	0.03	14.29
5.11	3.66	14.46	-	-	-	0.03	14.29

Tabla 6.7 Consolidado de la sexta semana con los resultados de los modelos de Bingham y de Potencia

Velocidad de corte γ $\left(\frac{1}{seg}\right)$	Lectura esfuerzo cortante τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Esfuerzo cortante de Bingham τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Índice de ley exponencial (n)	Índice de flujo K (Cps)	Esfuerzo cortante Exponencial τ $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$	Viscosidad μ_p $\left(\frac{lbf \cdot seg}{ft^2}\right)$	Punto de cedencia YP $\left(\frac{Lbf}{100ft^2}\right)$
1021,80	27.61	28.71	0.73	0.17	27.61	0.02	5.29
510,90	16.63	17.00	0.58	0.43	16.63	0.02	5.29
340,60	13.12	13.10	0.70	0.22	13.12	0.02	5.29
170,30	8.08	9.19	0.40	1.03	8.08	0.02	5.29
5,11	1.98	5.40	-	-	-	0.02	5.29

Tabla 6.8 Consolidado de la séptima semana con los resultados de los modelos de Bingham y de Potencia

De acuerdo a cada semana evaluada el comportamiento de cada modelo reológico es diferente, y los resultados obtenidos fueron graficados en plano cartesiano cuyo eje de las abscisas viene dado por la tasa de corte y el eje de las ordenadas por el esfuerzo de corte. A este plano cartesiano se le conoce como reograma. El reograma se le practicó cada consolidado de semana, La figura 6.1 muestra el comportamiento de las muestras de fluidos de perforación para cada semana de estudio a las que se les hizo el análisis gráfico y se pudo observar que:

1. La tendencia real la conforman las lecturas directas obtenidas del reómetro de Fann, estos forman una curva con tendencia potencial pero que no parten del origen sino que toca el eje del esfuerzo de corte en determinado valor debido a la fuerza mínima requerida para romper los geles e iniciar los flujos. Entonces, este valor es el que se conoce como lectura de “punto de cedencia” a una velocidad de corte cero. La curva con tendencia exponencial puede observarse con dificultad en la figura 6.2, debido a que las otras curvas de los modelos no permiten apreciarla, sin embargo; se encuentra definida como la línea de “modelo experimental” en la figura 6.1
2. El modelo plástico de flujo de Bingham forma una línea recta y es graficada en los reogramas con los valores promedio de las muestra de cada semana para compararla con los valores reales. La pendiente de la porción rectilínea del modelo de Bingham constituye la viscosidad plástica y la intersección en el eje Y constituye el punto de cedencia de Bingham a la velocidad de corte cero. Se observa que este punto cedente es más alto que el punto de cedencia verdadero (curva experimental). A demás de esta comparación, se observa que hay una desviación de la viscosidad a bajas velocidades de corte con el perfil de flujo verdadero del fluido de perforación y se debe a que en la zona de flujo en la tubería el modelo Bingham simula muy bien a los valores reales, sin embargo en la zona de flujo en el espacio anular los valores arrojados en este modelo son mucho más altos que los valores reales. Se puede apreciar en la fig. 6.2

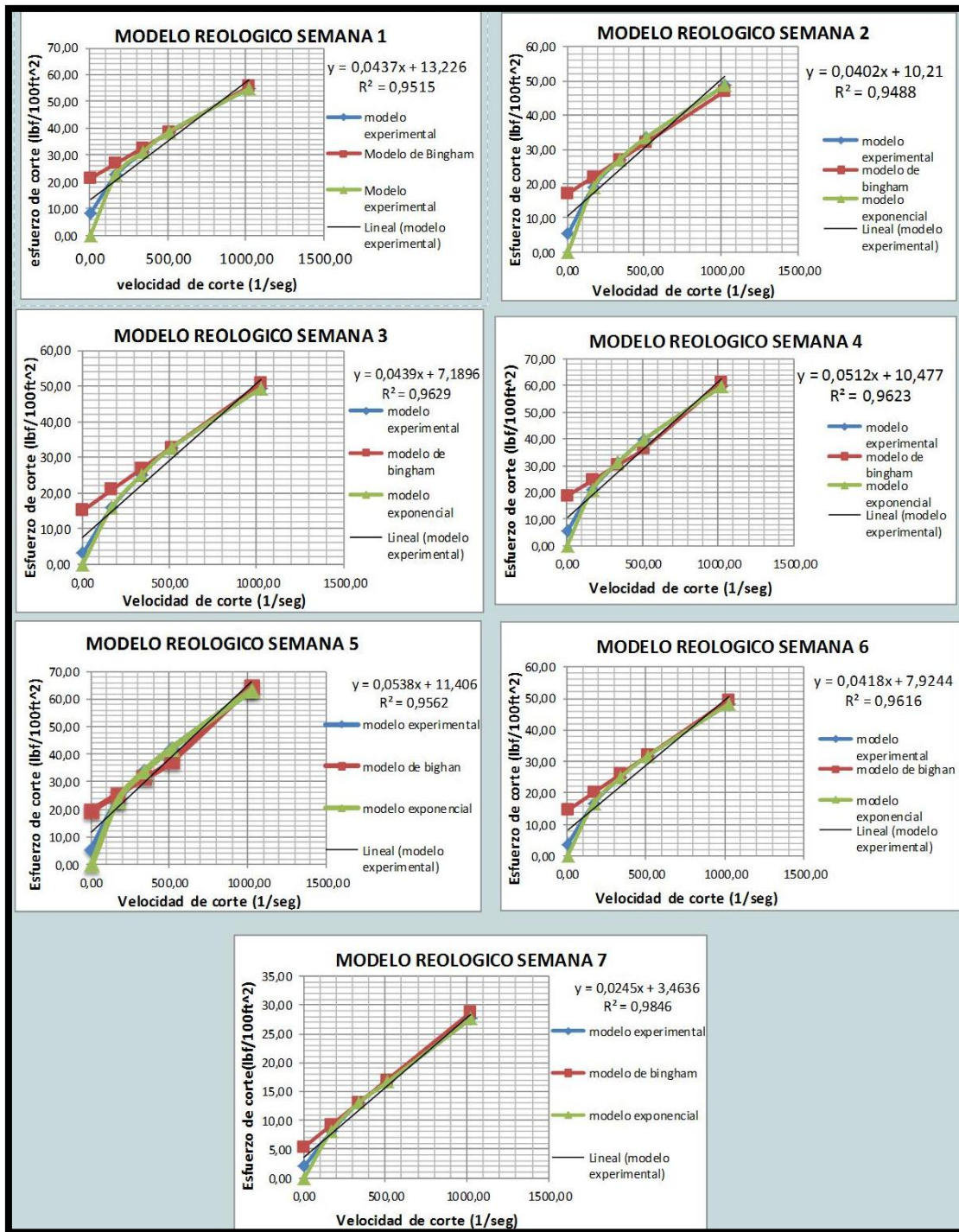


Figura 6.1 Reograma de los fluidos de perforación para cada semana de estudio

3. En cuanto al modelo de la Ley Exponencial, sí conforma una curva con tendencia potencial y llega al origen. Este fenómeno no sucede con los

valores reales ya que estos no tocan el origen del reograma, por lo tanto, el modelo de ley exponencial procura superar las deficiencias del modelo de Bingham por lo tanto, siempre reflejará resultados similares a los valores reales en la zona de flujo en la tubería pero producirá valores de esfuerzo de corte más bajos aunque con mejor aproximación que el modelo de Bingham en la zona del reograma que simula el flujo en el anular. Puede observarse esa tendencia y como este modelo describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte aumenta según la velocidad de corte elevada matemáticamente a una potencia determinada en la figura 6.2 que corresponde a los datos obtenidos para la semana 2.

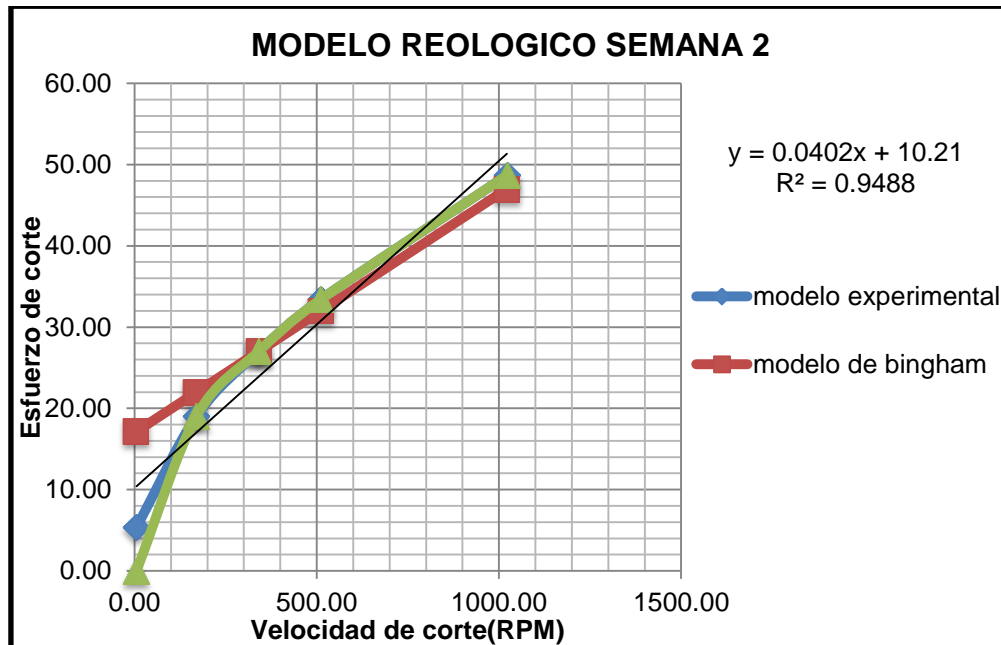


Figura 6.2 Comparación de los modelos reológicos con la tendencia experimental para el fluido de perforación de la segunda semana de muestreo.

- Comparando la tendencia de las gráficas y de los modelos reológicos para cada semana de estudio, se observa que siguen un mismo patrón de flujo, sin embargo, la diferencia radica en la variación de la viscosidad plástica en

las etapas de perforación, observándose que en la segunda y tercer semana la pendiente de la viscosidad y el punto de cedencia disminuyen originado por el estado de equilibrio entre la bentonita, arcillas y el agua.

También se graficó el comportamiento de los fluidos de perforación en escala logarítmica, con el objeto de observar la relación de esfuerzo/velocidad de corte del fluido y compararlo con las aproximaciones de los modelos reológicos de: la ley exponencial y el modelo de Bingham. Observando de forma general la figura 6.3:

1. Se observa mejor la tendencia de los datos experimentales en escala logarítmica y tiene la forma de línea recta, y se nota como los modelos de Bingham y Exponencial describen el perfil de un verdadero fluido de perforación para velocidades de corte mayor a 200 RPM.
2. Para la ley exponencial, al ser trazada en un gráfico en escala log-log, la relación de esfuerzo de corte/velocidad de corte de un fluido que obedece esta ley forma una línea recta, como lo indica la Figura 6.3. La "pendiente" de esta línea es "n" y "K" es la intersección de esta línea.

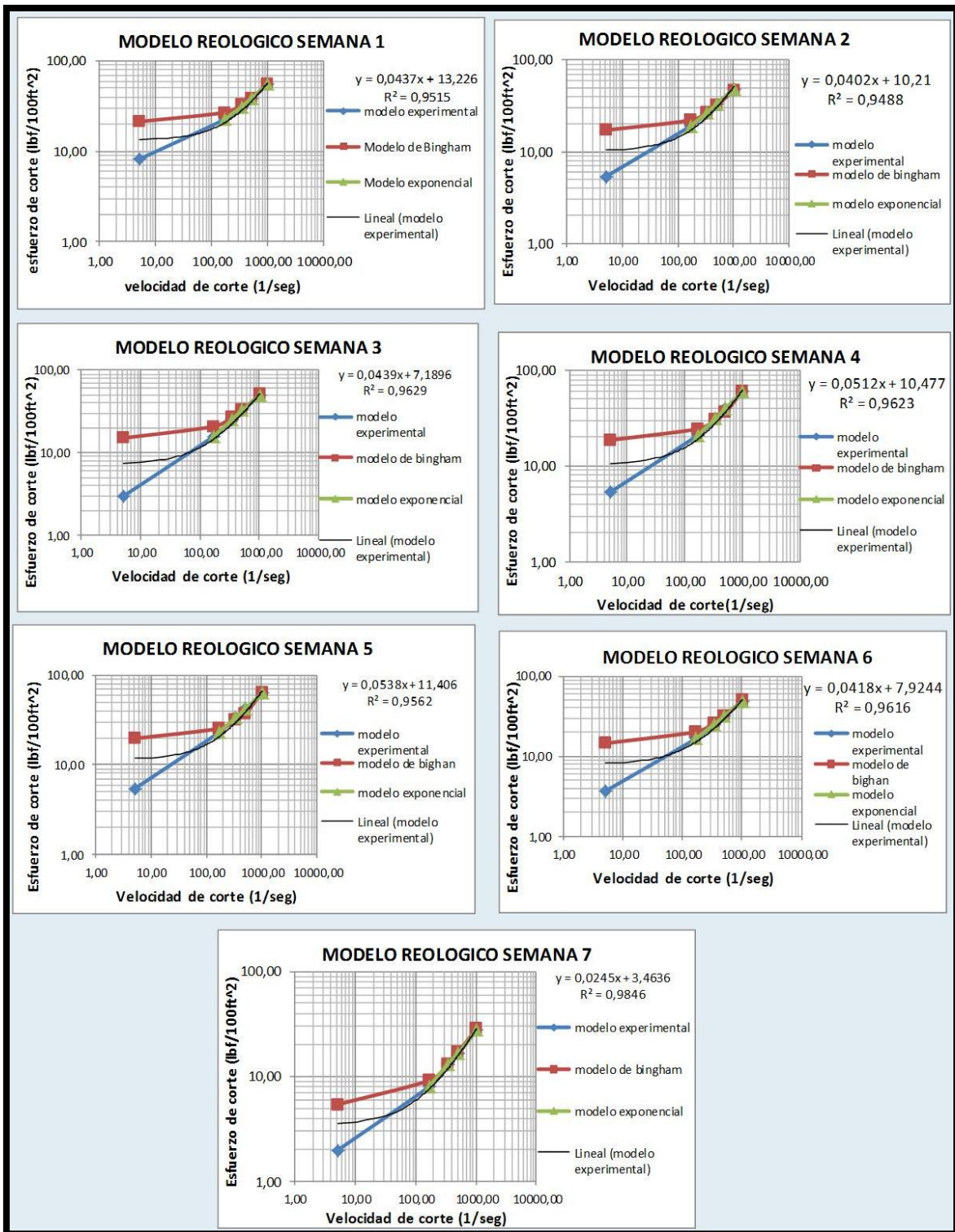


Figura 6.3 Representación de la tendencia de los modelos reológicos y la tendencia experimental en escala log-log

Para efectos de comparar el comportamiento experimental del fluido de perforación de cada semana, se presenta la figura 6.6 en la cual se observa que la viscosidad plástica a partir de la primer semana disminuye de tal forma que la segunda y tercer semana siguen un mismo comportamiento durante la etapa de perforación que corresponde a la fase de 17 ½"; luego en la semana 3 y 4 la viscosidad plástica incrementa con la velocidad de corte y que este incremento se le atribuye a incorporación de arenas que incrementa el total de solidos o por contaminación química. Ya en la última semana por ser la fase final de la operación de perforación.

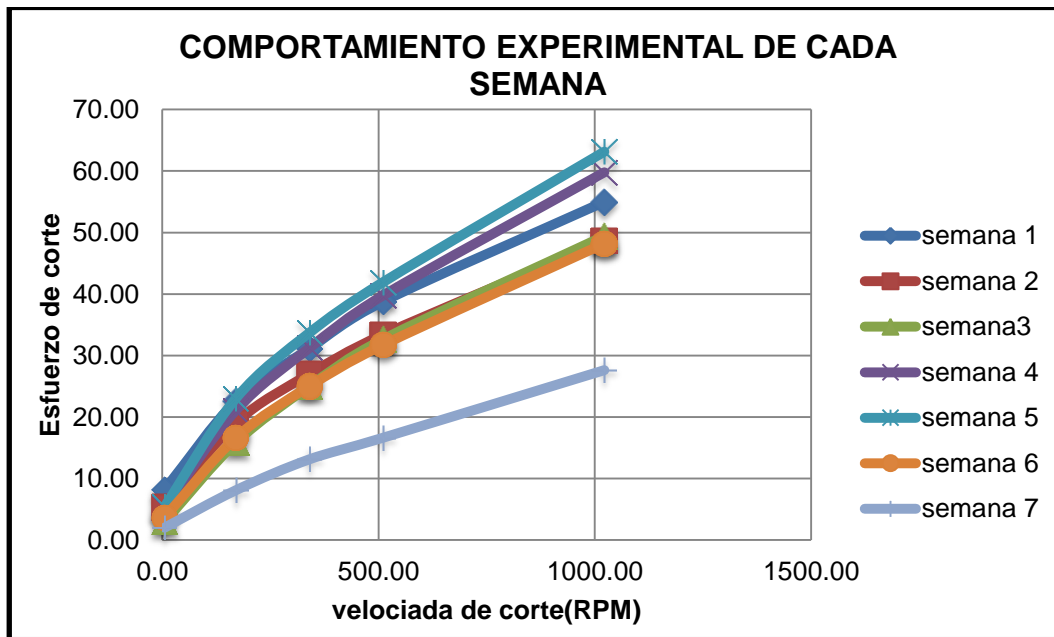


Figura 6.4 Comportamiento experimental del fluido de perforación para cada semana de muestreo

A demás se elaboró un consolidado reológico general en la cual se representa el patrón de flujo durante la perforación del pozo, ya que tanto el modelo de Bingham y el de ley exponencial ayudan a predecir el comportamiento del fluido observándose es este caso que el modelo de ley exponencial es el que mejor se aproxima a la tendencia experimental ya que Bingham es deficiente para velocidades de corte menores a 300 RPM.

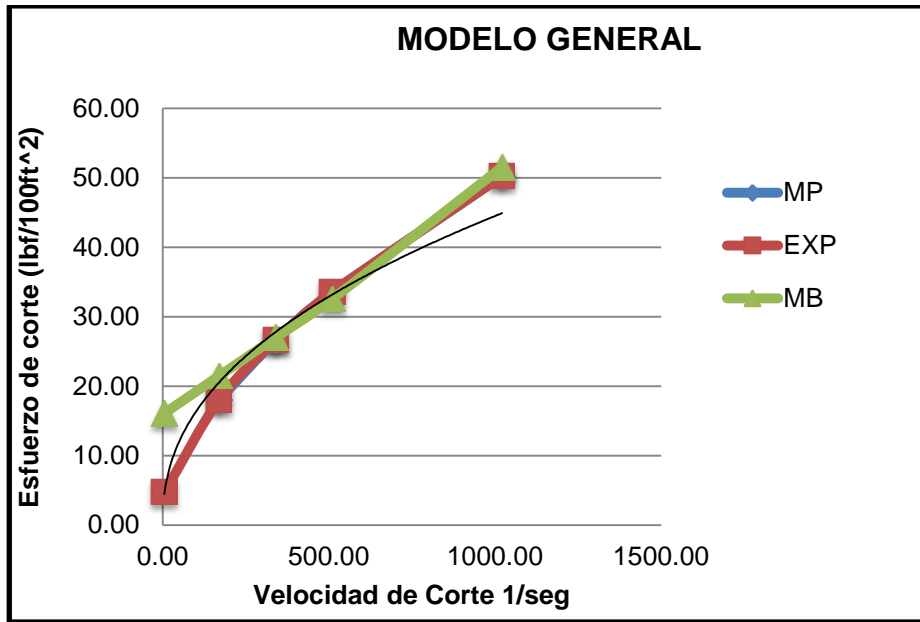


Figura 6.5 Perfil del flujo del fluido de perforación y el comportamiento según los modelos reológicos

Las ecuaciones que reflejan este comportamiento del fluido de perforación son las siguientes:

- Modelo de Bingham:

$$\tau = 0.00349 \gamma + 15.441 \quad \text{Ec. 6.16}$$

- Ley Exponencial:

$$\tau = 13.247 \gamma^{0.0369} \quad \text{Ec. 6.17}$$

Como se mencionó anteriormente la ley de potencia es el modelo que mejor predice el perfil de flujo del lodo de perforación, por lo tanto de acuerdo a la ecuación obtenida el índice de consistencia $K = 13.247 \frac{\text{lb}}{\text{seg}^2 \text{cm}^2}$ y el índice de ley exponencial $n = 0.0369$

6.2 RESULTADO DE PRUEBA DE AZUL DE METILENO Y VISCOSIDAD DE MARSH

La prueba de azul de metileno es para determinar la cantidad de solidos reactivos (solidos bentónicos) en el fluido de perforación, basado en la capacidad de intercambio catiónico en estas partículas sólida y en el caso de la viscosidad de Marsh, esta es una medida cualitativa que se utilizada para detectar cualquier variación de dicha propiedad, lo cual es indicativo de los posibles problemas del pozo.

Se dice que la viscosidad de Marsh aumenta con la integración del contenido de arcilla, es un indicativo cualitativo que el ingeniero de fluidos de perforación toma en cuenta para corregir las propiedades del lodo de perforación.

En la tabla 6.9 se presentan los datos correspondientes a la prueba de azul de Metileno y la viscosidad de Marsh del lodo de perforación para los días de muestreo.

Día	Concentración de arcilla ($\frac{Kg}{m^3}$)	Concentración de bentonita ($\frac{Kg}{m^3}$)	Arcilla natural ($\frac{Kg}{m^3}$)	Viscosidad de Marsh ($\frac{seg}{l}$)
1	46.31	45.4	0.91	65
2	49.88	45.4	4.48	100
3	42.75	40	2.75	70
4	42.75	40	2.75	78
5	49.88	45.4	4.48	40
6	49.88	45.4	4.48	64
7	35.65	18.16	17.49	61
8	49.88	18.16	31.72	57
9	57	18.16	38.84	48

Tabla 6.9 Concentración resultante de la prueba de azul de metileno y viscosidad de Marsh

Continuación de tabla 6.9: concentración resultante de arcillas y viscosidad de marsh

Día	Concentración de arcilla $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	Concentración de bentonita $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	Arcilla natural $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	Viscosidad de Marsh $\left(\frac{seg}{l}\right)$
10	49.88	18.16	31.72	75
11	64.13	18.16	45.97	52
12	57	18.16	38.84	52
13	67.69	18.16	49.53	59
14	42.75	18.16	24.59	52
15	71.25	18.16	53.09	69
16	57	18.16	38.84	75
17	57	18.16	38.84	49
18	42.75	18.16	24.59	50
19	49.88	18.16	31.72	49
20	49.88	18.16	31.72	40
21	49.88	18.16	31.72	55
22	42.75	34.05	8.7	63
23	49.88	34.05	15.83	57
24	60.56	34.05	26.51	80
25	60.56	34.05	26.51	70
26	42.75	34.05	8.7	85
27	42.75	34.05	8.7	72
28	49.88	34.05	15.83	65
29	49.88	34.05	15.83	68
30	49.88	34.05	15.83	61
31	35.63	34.05	1.58	60
32	42.75	34.05	8.7	52
33	49.88	34.05	15.83	56
34	53.44	34.05	19.39	52
35	64.13	34.05	30.08	45
36	49.88	34.05	15.83	45
37	35.63	34.05	1.58	45
38	49.88	34.05	15.83	45
39	35.63	34.05	1.58	35
40	35.63	34.05	1.58	45

Con la representación de la figura 6.6 se observa que el contenido total de arcillas presentes en el fluido de perforación incrementa a partir del séptimo día llegando a un valor máximo de $71.25 \frac{kg}{m^3}$ que corresponde al día 15.

Relacionando las fechas de análisis con la perforación se concluye que estos corresponden a la fase 17 ½", fase en la cual la presencia de arcillas naturales es mayor; estas se incorporan al lodo aumentando la concentración de arcillas lo que ocasiona una mayor plasticidad, mayor resistencia gel y disminución en el filtrado del lodo, la medida que se toma para contrarrestar este efecto es a través de la disminución o suspensión de la cantidad de Bentonita que se adiciona al lodo de perforación; otra observación es la tendencia de la viscosidad de Marsh que tiende a incrementar proporcionalmente con el incremento del contenido de la arcillas totales.

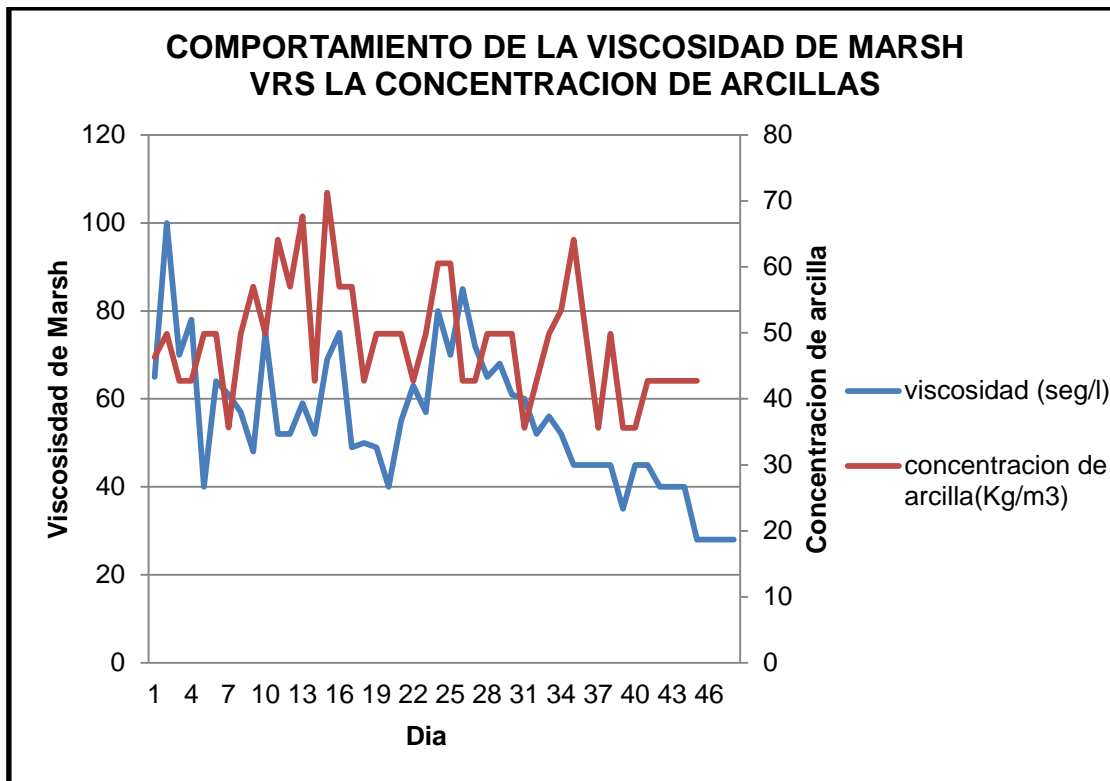


Figura 6.6 Comportamiento del contenido de arcillas en el fluido de perforación y la viscosidad de Marsh

Otras relaciones que dan evidencia que la presencia de arcillas naturales afectan en la perforación y específicamente en las propiedades del lodo de perforación son las que se muestran en la figura 6.7 se observa como la variación de la viscosidad plástica y del punto de cedencia están relacionadas con la densidad durante la operación de perforación y es notorio como las arcillas naturales tienden a incrementar la densidad y viscosidad plástica.

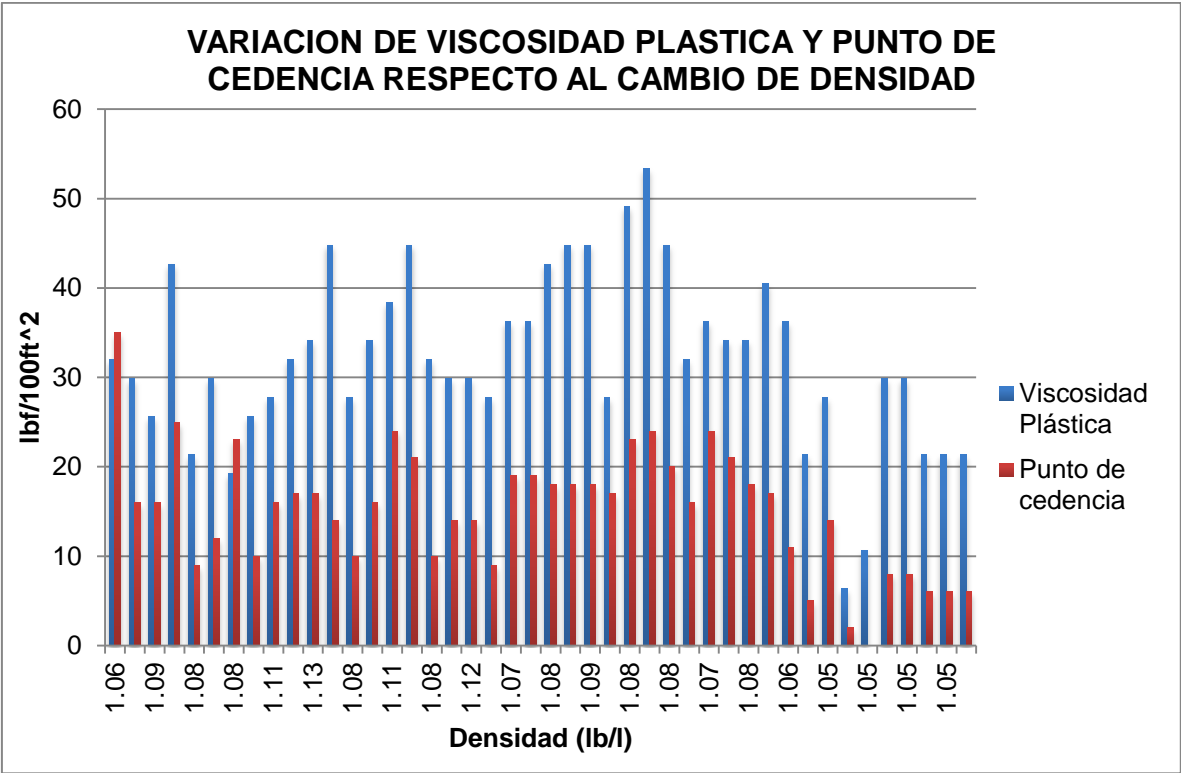


Figura 6.7 Comportamiento de la viscosidad plástica y punto de cedencia con la variación de la densidad.

Por lo tanto, se concluye que las propiedades del fluido de perforación tienen una conexión directa con la estabilidad de las arcillas.

7. DIAGNÓSTICO

Para poder inferir la influencia de las arcillas en el proceso de perforación y en la variación de los parámetros reológicos de un fluido de perforación es necesario conocer qué tipo de formación geológica existe en el campo geotérmico de Berlín, Usulután.

El campo geotérmico de Berlín, Usulután, pertenece al grupo de campos geotérmicos con manifestaciones en rocas volcánicas recientes y activas, localizado en la fosa tectónica central.

Su historia volcánica y la evolución geovulcanológica de dicho campo se inicia hace 3 millones de años con la formación del graben centroamericano, posteriormente hace más de 1.4 millones de años comienza el nacimiento del antiguo volcán de Berlín, que finaliza alrededor de hace 0.9 millones de años según dataciones de las principales formaciones de rocas; luego hace 0.1 millones de años se dio una erupción de ignimbritas seguida en consecuencia de mucha actividad volcánica formando así la caldera Graben de Berlín con un colapso parcial en uno de los flancos de su edificio volcánico, esto debido al hundimiento de una cámara magmática; el antiguo volcán hizo erupción, vaciando la cámara magmática y propiciando de esta manera el colapso del edificio volcánico, creando una depresión. Luego hace 75,000 años se dio la erupción pliniana de la caldera Blanca Rosa, para finalizar a menos de 75,000 años con la formación del complejo cuaternario de Tecapa. Como se muestra en la figura 7.1

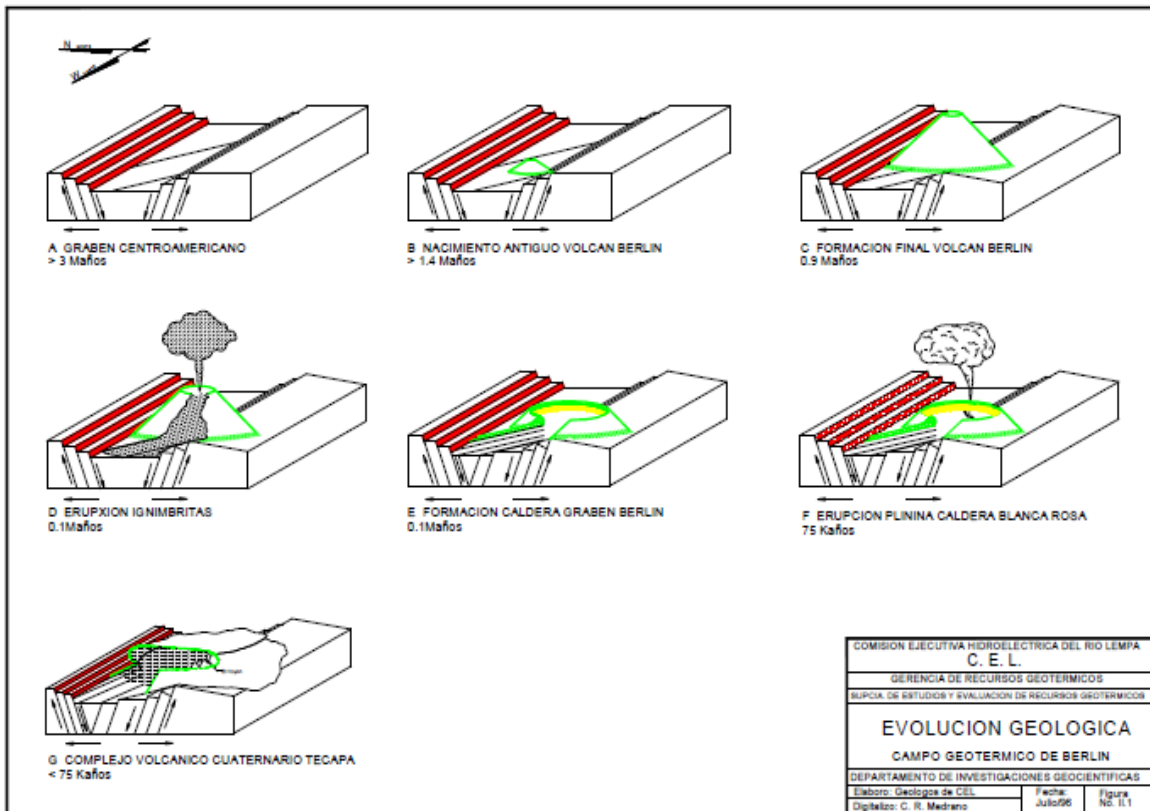


Figura 7.1 Historia volcánica y evolución geovolcanológica del Campo Geotérmico de Berlín, Usulután.

Toda la actividad geológica y volcánica del campo ha formado capas de diferentes materiales en el subsuelo, diferentes estratos y litologías en las cuales existen capas de rocas ígneas que al ser sometidas a la reacción química de interacción agua-roca producen alteraciones hidrotermales las cuales a su vez con el paso del tiempo y el avance de las reacciones químicas dan origen a las arcillas de la formación.

Las arcillas minerales se encuentran comúnmente durante la perforación como mezclas de arcillas y distintos tipos de minerales. Formaciones constituidas por consolidación de arcilla, limo o lodo, que se caracterizan por tener estructura laminar; en una proporción que puede variar entre 15% y 100%, en contenido de arcilla, y otros minerales accesorios como cuarzo, carbonatos y feldspatos. De aquí que las formaciones arcillosas cobran un amplio rango de composiciones y presentan propiedades mecánicas y fisicoquímicas muy diferentes; que en la

mayoría de ocasiones presentan problemas debido a su hidratación o dispersión al agregarse en forma natural al fluido de perforación.

Entre las arcillas encontradas en las formaciones que se perfora tenemos:

- a) Esmectita: un grupo de minerales arcillosos que tienen existen frecuentemente en forma de mineral de capas mixtas, algunas capas contienen iones intercambiables y agua mientras que otras capas están “aplastadas”, con átomos de potasio. Este grupo de minerales incluye la montmorillonita, la hectorita, la saponita, la nontronita y otros minerales específicos.
- b) Illitas: Que son arcillas no expandibles de tres capas, las cuales se distinguen de la montmorillonita principalmente por la ausencia de intercapas que se ensanchan al contacto con el agua. Este tipo de arcilla no causa mayores complicaciones durante la perforación, debido a que es no expandible.
- c) Caolinita: es menos reactiva que otros minerales arcillosos. Su estructura básica se compone de capas intercaladas de sílice y alúmina. El tamaño cristalino de la Caolinita es típicamente más grande que el tamaño cristalino de la esmectita o illita, y tiene una superficie específica más pequeña, una capacidad de intercambio catiónico más baja y una menor capacidad de adsorber el agua. La arcilla Caolinita puede dispersarse en los fluidos de perforación base agua.
- d) Cloritas: Las cloritas son un grupo de arcillas minerales arcillosos específicos, las cuales estructuralmente se asemejan a una arcilla de 3 capas y su capacidad de intercambio de cationes es baja y tampoco ocasionan mayores complicaciones durante la perforación pues no contiene agua entre las capas.
- e) Arcillas de capas mezcladas: Muchas arcillas están compuestas de más de una arcilla mineral las cuales pueden estar mezcladas de diferente manera.

Estas estructuras de capas mezcladas, son una consecuencia del efecto de la composición de las hojas en diferentes capas de arcillas minerales.

En el pozo de estudio pudieron obtenerse muestras de recortes de perforación que reflejaban de forma cualitativa la presencia de las arcillas de formación en diferentes cantidades. La tabla 7.1 contiene la descripción de las arcillas presentes en los recortes de perforación.



Muestra de recorte	Descripción
	<p>En la muestra de recorte se observa la presencia de arcillas en color café-rojizo junto con otros recortes de lava. Esta muestra de recorte se encontraba sin lavar, pero tenía un mayor tiempo transcurrido después de obtenida por lo que había perdido humedad.</p>
	<p>La siguiente muestra de recorte era un poco más frecuente pues aún observaba las cualidades propias del fluido de perforación, en color gris y de partículas más gruesas que el anterior.</p>
	<p>En esta muestra puede observarse una coloración predominantemente café claro, indicio de la presencia abundante de arcillas naturales en la misma, pues además su consistencia era más plástica y viscosa, con menos partículas sólidas y de pequeño tamaño.</p>

Tabla 7.1 Muestras de arcillas encontradas en el campo geotérmico de Berlín pozo TR18B

Continuación de Tabla 7.1 Muestras de arcillas del campo geotérmico de Berlín.

Muestra de recorte	Descripción
	<p>Una descripción similar a la anterior se encuentra en esta muestra de recortes pero con una coloración más grisácea debido posiblemente a la presencia de aditivos, rocas ígneas de formación y arcillas.</p>

Según el análisis realizado a los lodos de perforación de un pozo en el campo geotérmico de Berlín, pudo observarse la aparición de una mayor presencia de arcillas naturales en la etapa de 17 1/2”.

Durante esta etapa el comportamiento reológico mostrado por el fluido de perforación, el cual es una mezcla de aditivos y arcillas bentoníticas. Etapa en la cual existen cambios en la reología del fluido.

Estos cambios se ve reflejado también en la prueba de azul de metileno que es una propiedad fisicoquímica que mide el intercambio catiónico de la sustancia y el cual da un indicio del contenido de arcillas por metro cúbico que se incorpora en el lodo de perforación.

Debido a que generalmente en esta etapa de la perforación, la formación encontrada corresponde a escorias y lavas intracaldérica de Berlín (andesitas, andesitas-basálticas y basálticas), que son rocas ígneas que bajo condiciones de intemperismo sufren alteraciones hidrotermales, convirtiéndose con el paso del tiempo en arcillas; puede inferirse que al observarse un incremento en el total de arcillas contenidas en el lodo de perforación y una variación en las propiedades reológicas, está ocurriendo una adición de arcillas naturales de la formación hacia el lodo de perforación causando a la vez problemas en la operación de perforación

provocando inestabilidad del pozo debido al cambio radical del esfuerzo mecánico y de los ambientes químicos y físicos durante la perforación.

La inestabilidad del pozo suele ser indicada por arcillas que se hidratan y desintegran, dando como resultado una expansión de las mismas y por consecuencia el derrumbe, resultando en ensanchamiento del pozo.

Las consecuencias más comunes son la pegadura de la tubería representa uno de los problemas de perforación más comunes y más graves. La gravedad del problema puede variar de una inconveniencia menor que puede causar un ligero aumento de los costos, a complicaciones graves que pueden tener resultados considerablemente negativos, tal como la pérdida de la columna de perforación o la pérdida total del pozo, o una producción reducida.

Por lo tanto, la influencia de las arcillas en la pegadura de tubería puede darse de dos formas:

- **Arcillas Reactivas:** Estas son arcillas sensibles al agua, perforadas con insuficiente inhibición. Las arcillas absorben agua, se someten a esfuerzo y se adhieren dentro del pozo (ver la Figura 7.2).

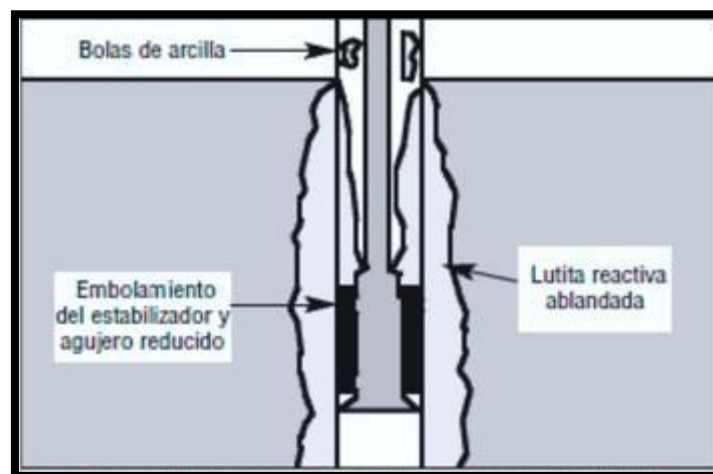


Figura 7.2 Formación arcilla reactiva

La perforación a través de arcilla reactiva es indicada principalmente por aumentos de la viscosidad de embudo, del punto cedente, de los esfuerzos de

gel, de la Prueba de Azul de Metileno (MBT) y posiblemente del peso del lodo. Esto se reflejará en los aumentos de torque, arrastre y presión de bombeo.

- **Arcillas Presurizadas:** Estas arcillas están presurizadas y sometidas a esfuerzos mecánicos por diferentes factores, incluyendo el peso de la sobrecarga, los esfuerzos in-situ, el ángulo de los planos de estratificación y los esfuerzos tectónicos. Cuando son perforadas con un peso de lodo insuficiente, estas arcillas se desprenden dentro del pozo (ver figura 7.4).

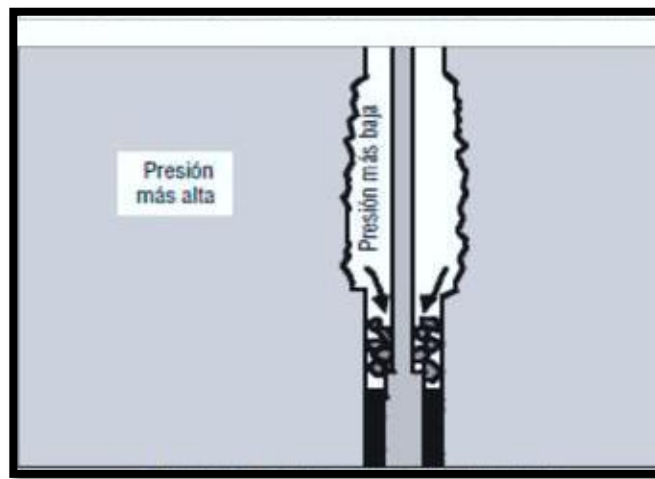


Figura7.3 Formaciones presurizadas

- **Formaciones Fracturadas y Falladas:** Éstas son formaciones frágiles que son mecánicamente incompetentes. Son especialmente inestables cuando los planos de estratificación se inclinan hacia abajo con altos ángulos (ver la Figura 7.4).

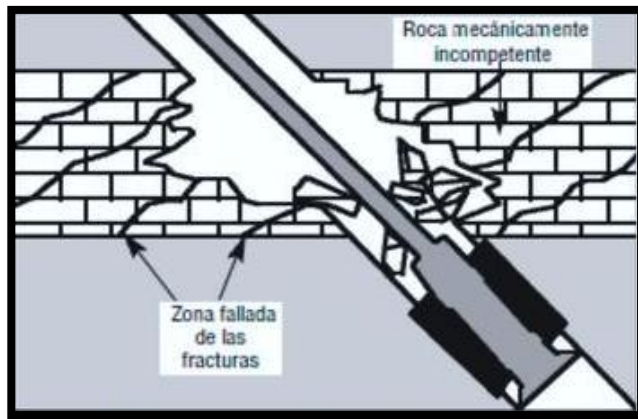


Figura7.4 Formaciones fracturadas y fallas

Se encontrarán grandes cantidades de arcilla astillosas, cuando las arcillas presurizadas son perforadas con un desbalance de presiones o cuando las formaciones fracturadas se desprenden. La presión de bombeo, el esfuerzo cortante y el arrastre aumentarán cuando el pozo está sobrecargado de arcilla derrumbada.

Otro problema consecuencia de la pegadura de tubería son la desviación del pozo, y otras consecuencias de la influencia de las arcillas son: el desgaste de la barrena por las formaciones duras y abrasivas, dificultades relacionadas con los registros y su interpretación, dificultades en la recuperación de núcleos laterales, dificultades al meter la tubería de revestimiento y cementaciones de mala calidad.

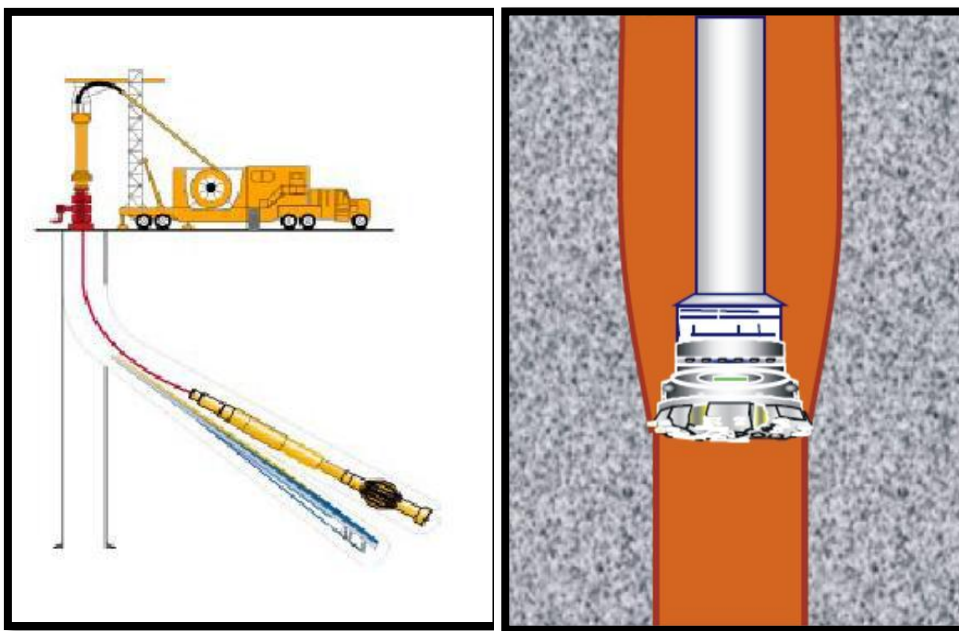


Figura 7.5 Desviación y reducción del diámetro del pozo por inestabilidad causado por las arcillas “Side Track”

Entonces, el control de la inestabilidad de la formación debería comenzar durante la fase de planificación del pozo. Un sistema de lodo inhibido, adaptado a la formación con el peso de lodo apropiado, minimizará la inestabilidad de la arcilla, y el comportamiento o influencia en el proceso de perforación es predecible mediante el desarrollo de un modelo reológico como el anteriormente presentado, el cual permite el desarrollo de medidas que contrarresten el efecto nocivo de las mismas tanto en el equipo de perforación como en la operación en general.

8. PROPUESTA DE METODOLOGÍA A SEGUIR PARA EL CONTROL DE LOS EFECTOS DE ARCILLAS NATURALES DE LA FORMACIÓN EN EL PROCESO DE PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS

A partir del diagnóstico realizado en el presente trabajo de graduación a las arcillas naturales existentes en un pozo geotérmico de Berlín, Usulután y atendiendo al programa de perforación que el ingeniero de lodos debe seguir; se elabora la siguiente propuesta de la metodología a desarrollar para contrarrestar el efecto negativo de las arcillas naturales en cada una de las etapas del desarrollo de la perforación.

Las etapas del programa de perforación a tomar en cuenta para la realización de la propuesta serán aquellas que presenten una influencia representativa de las arcillas en las mismas. Estas etapas consisten en las correspondientes a los diámetros de 23", 17½" y 12¼".

8.1 METODOLOGÍA

A continuación se presenta una metodología que permite llevar a cabo un control adecuado de la influencia de las arcillas naturales existentes en el campo de Berlín, Usulután. La metodología considera la influencia de las arcillas en el proceso de perforación, por lo que va dirigida hacia la prevención de problemas ocasionados por las mismas mediante el estudio constante de las propiedades de las mismas a partir del fluido de perforación y a tomar medidas correctivas una vez se ha ocasionado el problema. La metodología la conforman 3 etapas que se muestran y se detallan a continuación. Se considera una metodología multidisciplinaria, pues para su aplicación se requiere la participación del geólogo y del ingeniero de lodos de perforación y el equipo que forma parte del proceso de perforación.

8.1.1 ETAPA 1: Evaluación de las condiciones del campo y de la Perforación

En esta primera etapa se identifica el origen de algunas de las dificultades de perforación observados en el campo y las zonas más problemáticas donde

predomina la presencia de arcillas. Para luego desarrollar los respectivos informes de perforación que permitan la visualización de las condiciones actuales del proceso de perforación.

a) Recolección de Datos

En esta etapa se colectan datos del campo y de los pozos en los que se trabaja en la actualidad. A continuación se citan los datos a recolectar clasificados según el tipo de información:

- **Reportes diarios de perforación:** fecha, profundidad, tasa de perforación (ROP), galonaje (GPM), eventos de perforación, registros de torque, presiones en el anular y tubería.
- **Reportes de fluidos de perforación:** densidad, propiedades reológicas, porcentaje de sólidos, formulación promedio (concentración y aditivo).
- **Datos geológicos:** mapa estructural, columna estratigráfica (topes y bases, nombre de la formación), sección estructural e historia geológica.
- **Gradiente geotérmico.**

b) Construcción de Resúmenes de Perforación

En esta etapa se ordenan los datos de perforación de manera que se haga más fácil su interpretación. Estos informes se hacen, en primer lugar por pozo y luego se pueden agrupar para todo el campo.

- **Resumen geológico:** Con un mapa del área se puede conocer la ubicación de los pozos. Se debe conocer la columna estratigráfica con los topes y bases de las formaciones atravesadas durante la perforación del pozo. La geología se caracteriza usando registros y reportes geológicos, combinado con registros sísmicos, si existen. También, se debe incluir el ángulo de los planos de estratificación

- **Resumen de arquitectura del pozo:** Es un diagrama de la arquitectura del pozo que debe incluir información acerca del diámetro del agujero y tubería de revestimiento, profundidad de asentamiento de tubería de revestimiento.
- **Resumen de días de perforación:** Consiste en registrar días de perforación con profundidad, cuantificar los días de perforación (sin problemas) y los días perdidos por eventos no planificados (con problemas). Se puede cuantificar tiempo de agujero abierto.
- **Resumen de fluido de perforación:** Información que se extrae de los reportes diarios de lodos. En este resumen se presenta el tipo de fluido utilizado en cada pozo, así como, las propiedades del lodo a lo largo de la perforación: densidad, viscosidad de embudo, viscosidad plástica, punto cedente, esfuerzo de gel 10"/10', contenido de sólidos de baja y alta densidad, volumen de filtrado. Se deben extraer las formulaciones de fluidos de perforación usados.
- **Resumen de problemas de perforación:** Las dificultades encontradas durante la perforación pueden estar asociadas a problemas de inestabilidad. En esta parte se presentan los problemas que surgen durante la perforación de los pozos previos relacionados con la formación arcillosa. El resumen de eventos se puede realizar, primero por pozo y luego compilarlo por campo, mediante gráficos específicos que permitirán identificar el origen del problema, correlacionando el síntoma con las posibles variables que lo originan. Se deberán identificar eventos tales como: taponamiento de mallas y líneas de flujo, embolamiento de barrena, repasos, pérdida de circulación, arrastres, pegas diferenciales, pegas o atascamiento mecánicos.
- **Resumen de viajes:** Planificados (de limpieza, de acondicionamiento) y no planificados, así como tiempo de viaje para cada uno y condiciones de viaje.

8.1.2 ETAPA 2: Análisis del Proceso de Perforación

En esta etapa se analiza el proceso de perforación para identificar los problemas relacionados a la presencia de arcillas en la formación y la severidad de los mismos. Se correlaciona la geología y la densidad con las dificultades encontradas, así como se evalúa el desempeño de los fluidos de perforación, finalizando con el análisis de condiciones de perforación.

- **Identificar las etapas problemáticas:** Se esperaría para el campo Geotérmico de Berlín, Usulután, que la etapa más problemática correspondiera a la de 17½”, pero comienza a manifestarse en la de 23” y aun manifestarse en la etapa de 12¼”. Por lo que cualquier dificultad encontrada en estas etapas debe ser de especial interés.
- **Clasificación de la severidad del Problema:** Debido a que el principal problema que causan las arcillas naturales de la formación es la inestabilidad en el agujero de perforación y sus consecuentes efectos negativos (pegadura de la tubería, embolamiento de la barrena, ensanchamiento del pozo). El problema de estabilidad de agujero se puede clasificar de acuerdo a la severidad del problema. Para ello se deben conjugar los resúmenes de fluidos de perforación y los de problemas de perforación. Se pueden encontrar tres tipos de severidad: baja severidad cuando los síntomas existen pero no se requirió acciones correctivas; media severidad cuando se evidencian los síntomas y se solventaron con algunas medidas correctivas, por ejemplo, repasos cuando ocurre un apoyo o arrastre, y severidad alta cuando se evidencia algún síntoma y las medidas correctivas tomaron más tiempo del estimado o no se pudo remediar el problema, por ejemplo, pérdidas del agujero, “Side Track”, etc.
- **Correlación entre geología y eventos de perforación:** Es preciso conocer las formaciones atravesadas y los eventos ocurridos en relación con la estratigrafía, al momento de extrapolar la experiencia de un pozo a otra localización en la misma región.

- **Correlación entre densidad y eventos de perforación:** La mayoría de los eventos de perforación, tales como, pérdida de circulación, atascamientos, torques, apoyos y arrastres, pegas diferenciales, están relacionados con un exceso o deficiencia de densidad. Esto ayudará a identificar el intervalo de densidad, para determinadas condiciones de perforación, con las cuales se obtuvo el más alto o más bajo desempeño.
- **Desempeño de los fluidos de perforación utilizados:** tipo, propiedades y densidad: Se correlacionan los problemas ocurridos y los fluidos de perforación utilizados con el fin de obtener información sobre interacción fluido-roca. Aquí se identificaran aditivo, formulaciones, con las cuales se obtuvo el más alto o más bajo desempeño.
- **Análisis de condiciones de perforación (galonaje, ROP², WOB³, torque, presiones en anular y tubería):** Diversas condiciones de perforación puede dar indicios del origen del problema tales como: valores de ROP anormales pueden indicar posibles problemas en la tubería de perforación (embolamiento). También, valores altos de torque pueden estar relacionados con restricciones geométricas en el hoyo (ej. anillos de formaciones plásticas alrededor de la sarta), así como aumentos de las presiones del anular. También se verifica la velocidad en el anular durante la perforación con los datos de diámetro de agujero promedio real, obtenido con los “cáliper”, galonaje y ROP; para descartar que los problemas de atascamiento, apoyos y arrastres haya ocurrido por acumulación de ripios dentro del agujero.
- **Caracterización Fisicoquímica y Reológica de las arcillas naturales:** Esta es la parte central de la etapa del análisis del proceso de perforación, pues se determinarán las características de las arcillas naturales a partir del fluido de perforación. Como ya se describe en el capítulo 4 del presente

² ROP: Tasa de penetración

³WOB : Peso sobre barrena por sus siglas en ingles.

trabajo de graduación sobre las pruebas de laboratorio a efectuársele al lodo de perforación, se realizan las pruebas fisicoquímicas de densidad, pH del filtrado y prueba de azul de metileno que es el indicador de la cantidad total de arcillas presentes en el fluido de perforación. Luego se realizan los ensayos para determinar las propiedades reológicas de viscosidad plástica, punto cedente, viscosidad de marsh y esfuerzo de gel. El resultado de estas pruebas y su debido registro en los reportes de perforación permitirán desarrollar un modelado reológico como el visto en el capítulo 5 de este documento y su respectivo análisis para luego realizar un diagnóstico de las arcillas naturales de formación y como se verá en la siguiente etapa a partir de los datos anteriormente mencionados buscar una solución ante los efectos negativos que las arcillas estarían provocando, de manera preventiva y correctiva.

8.1.3 ETAPA 3: Toma de Decisiones

Debido a que son muy conocidos los problemas que las arcillas naturales de formación ocasionan al proceso de perforación cuando estas se incorporan al fluido de perforación, que se resumen a la inestabilidad en la estructura del pozo lo que lleva a embolamiento de barrena, pegaduras de tubería, ensanchamiento del agujero; se presentan a continuación una serie de medidas a tomar en caso de presentarse dichos problemas durante la perforación. Mediante un resumen de toma de decisiones en la etapa en la que se ven comprometidas las arcillas en mayor proporción que es en la de 17½”.

ETAPA DE 17½” ϕ

Durante esta etapa se observa el incremento de la presencia de las arcillas naturales en el Campo Geotérmico de Berlín, Usulután de manera considerable, por lo que es común que se presenten variedad de inconvenientes causados por las mismas. De manera que en esta etapa se debe tener un especial cuidado y un

adecuado seguimiento del comportamiento reológico del lodo de perforación para poder prevenir o corregir efectivamente los diferentes problemas que pudiesen presentarse, relacionadas a la inestabilidad en el pozo provocado por las mismas. La inestabilidad del pozo es causada por:

- **Esfuerzo mecánico:** Rotura causada por la tensión –fracturación y pérdida de circulación, Rotura causada por la compresión– fisuración y colapso o flujo plástico, Abrasión e impacto.
- **Interacciones químicas con el fluido de perforación:** Hidratación, hinchamiento y dispersión de la arcilla, Disolución de formaciones solubles.
- **Interacciones físicas con el fluido de perforación:** Erosión, Humectación a lo largo de fracturas preexistentes (arcilla frágil), Invasión de fluido – presión.

i) Prevención y corrección de problemas por Esfuerzo Mecánico

La falla del pozo que se debe al esfuerzo mecánico suele ser causada por una de dos situaciones. Primero, el peso del lodo es demasiado alto, provocando una fractura (roca bajo tensión) que causa la pérdida de circulación. Segundo, el peso del lodo es demasiado bajo, causando el derrumbe (fisuración) o colapso (roca bajo compresión) de la roca, La abrasión mecánica y el impacto de la columna de perforación también pueden causar el ensanchamiento del pozo y producir la inestabilidad de las rocas frágiles.

1. **Rotura-Fracturación causada por la tensión:** Las rocas tienen bajas resistencias a la tensión. En realidad, las formaciones de arena no consolidada o fracturadas tienen una resistencia a la tensión igual a cero. Las areniscas suelen tener una resistencia a la tensión más baja que la

arcilla. Las rocas duras pueden tener resistencias a la tensión de 300 a 600 psi. Normalmente se aumenta el peso del lodo para controlar el flujo de gas y líquidos dentro del pozo, manteniendo una presión hidrostática ligeramente más alta que la presión poral. Si la presión del lodo excede el gradiente de presión de la roca, una fractura comienza a formarse, causando la pérdida de circulación. La fracturación y la pérdida de circulación tienen un efecto perjudicial sobre la integridad y estabilidad del pozo, especialmente en las formaciones medianamente duras.

- 2. Rotura/colapso causado por la compresión o flujo plástico:** Las rocas tienen resistencias a la compresión que varían generalmente de 4.000 a 15.000 psi. Si el peso del lodo no es suficiente para balancear este esfuerzo máximo admisible de la roca, puede ocurrir una rotura.

Las arcillas sometidas a esfuerzos y las arcillas presurizadas son dos problemas especiales de estabilidad del pozo que ocurren porque el peso del lodo no es suficiente para satisfacer las resistencias a la compresión.

- 3. Arcillas sometidas a Esfuerzos:** Algunas arcillas sometidas a esfuerzos no pueden ser totalmente controladas por el peso del lodo, porque pueden producirse problemas de pérdida de circulación (y otros). Para estas situaciones, parte de las arcillas de la formación siempre tendrán tendencia a derrumbarse dentro del pozo. Ocasionalmente, el mejor método consiste en tratar el problema desde el punto de vista sintomático, mejorando la limpieza del pozo y tratando de tolerar el problema sin permitir que se produzca cualquier problema grave de perforación. Para mejorar la limpieza del pozo, se debe usar un sistema de lodo que disminuya considerablemente su viscosidad con el esfuerzo de corte con un valor “n” bajo y altos esfuerzos de gel, además de mantener buenas características del enjarre y un filtrado bajo. El valor “n” bajo ayudará a impedir el derrumbe causado por los esfuerzos al mantener un perfil de flujo hidrodinámico, y ayudará a limpiar el pozo. Los altos esfuerzos de gel suspenderán las

arcillas que se derrumban cuando la sarta de perforación está fuera del pozo.

4. **Arcillas Presurizadas:** La compactación durante el tiempo geológico exprime los fluidos fuera de las arcillas y dentro de formaciones permeables, resultando en presiones de la formación que son iguales o se acercan a la presión de sobrecarga. Esto ocurre generalmente en los planos de estratificación que separa a las arenas de las arcillas, causando la descomposición de las arcillas en escamas y su subsiguiente caída en el pozo. El problema de las arcillas causado por la presión es relativamente simple, aumentar el peso del lodo y la densidad para crear una presión hidrostática suficiente para confinar la presión de la formación.

ii) **Prevención y corrección de problemas por Interacciones Químicas con el Fluido de Perforación**

Para lograr la adecuada corrección de los problemas ocasionados por interacciones químicas entre las arcillas y el lodo de perforación se debe tomar en cuenta, los siguientes aspectos:

- **Hidratación de las Arcillas**

La inestabilidad y el ensanchamiento del pozo también son afectados por la química del fluido de perforación base agua y su efecto sobre la arcilla. La mayoría de las veces, las arcillas sensibles al agua o hidratables contienen altas concentraciones de montmorillonita. Por lo tanto, los sistemas de clasificación suelen usar el contenido de montmorillonita como medida principal de la reactividad con los lodos base agua. La CEC (Intercambio catiónico) es útil para determinar el contenido total de arcilla, el contenido de agua, la superficie y la dureza. Incluso las que contienen arcillas que se hidratan menos, como las arcillas de tipo illita, clorita o caolinita, son afectadas en cierta medida por la interacción con la química del lodo base agua.

La hidratación por el agua es una de las causas más importantes de la inestabilidad del pozo. La hidratación puede ocurrir de dos maneras en las arcillas

sensibles al agua: adsorción superficial y osmótica. La hidratación superficial ocurre cuando un pequeño volumen de agua se adsorbe fuertemente en las superficies planas de las arcillas, lo cual causa poco ablandamiento o hinchamiento, pero puede producir esfuerzos excesivos si el hinchamiento está confinado. El hinchamiento osmótico ocurre cuando un gran volumen de agua débilmente retenida es atraído por las superficies de arcilla por las fuerzas electrostáticas. El hinchamiento osmótico causa el ablandamiento y un hinchamiento considerable, a medida que las capas de arcilla adyacentes hidratan el agua y se expanden. El hinchamiento osmótico no genera esfuerzos excesivos, incluso cuando está confinado, y puede ser reducido considerablemente si se usa un lodo salado de baja actividad. Las arcillas que contienen montmorillonita pueden adsorber agua del fluido de perforación e hidratarse o dispersarse. La rotura se produce generalmente mediante la constricción del pozo a partir de una zona hinchada ablandada o mediante la fisuración de fragmentos relativamente firmes.

El hinchamiento es producido entonces por una transferencia de agua del lodo dentro de la arcilla o del agua de la arcilla dentro del lodo. La arcilla se vuelve inestable cuando es alterada de cualquier manera, ya sea por hidratación o deshidratación. Es importante impedir la transferencia de agua entre el fluido de perforación y la arcilla que puede causar la alteración de la arcilla. Esto se puede lograr balanceando la actividad (concentración iónica) del lodo con la actividad de las arcillas.

Un fluido de perforación ideal sería uno que no altere de ninguna manera a las arcillas. Según la literatura consultada han sido probados muchos tipos de lodos de perforación, tal como el lodo cálcico, lodo yeso, etc. No disponibles en las perforaciones que se realizan en El Salvador, comúnmente se usa POLIVIS, EZMUD, entre otros.

El hecho de limitar cualquier forma de interacción del agua con las arcillas sensibles al agua tiene una ventaja apreciable. En concentraciones suficientes, los

polímeros actúan para recubrir las arcillas y los recortes expuestos, “encapsulándolos” con una capa ligada de polímero. Esto limita la capacidad del agua para interactuar con la arcilla e impide que los recortes se dispersen. Los polímeros también aumentan la viscosidad de filtrado del fluido, de tal manera que la transferencia de agua será más lenta.

Además, los materiales insolubles en agua y los agentes de taponamiento pueden mejorar considerablemente la estabilidad del pozo. También reducen la invasión de agua en las arcillas al obturar los microporos. Estos materiales son especialmente eficaces en arcillas firmes que tienden a microfracturarse. Además la reducción del filtrado con aditivos de polímeros aumenta la viscosidad del filtrado y reduce el influjo de filtrado de lodo en las arcillas.

Otro factor que afecta la estabilización de las arcilla es el pH. Casi todos los lodos están controlados dentro de un rango alcalino, con un pH 7.0 o mayor. Al controlar el pH del fluido dentro del rango de 8,5 a 9,5, se obtiene una mejor estabilidad del pozo con un control adecuado de las propiedades del lodo. Un pH anormalmente alto, como el que se obtiene con el lodo cálcico, no atenúa sino que favorece los problemas en algunas arcillas. Las presiones dentro de las arcillas y el buzamiento de las formaciones complican aún más el problema. Existen tres remedios fundamentales para resolver un problema de este tipo en la arcilla:

1. Densidad suficiente.
2. Rango correcto de pH.
3. control del filtrado.

Para minimizar las interacciones del lodo base agua con las arcillas:

1. Usar el mejor sistema iónico inhibidor
2. Usar los valores de filtrado más bajos posibles.
3. Usar un polímero encapsulador.
4. Usar polímeros para aumentar la viscosidad del filtrado a fin de reducir el filtrado.
5. Usar el pH más bajo posible para un sistema en particular.

6. Usar un aditivo líquido insoluble en agua para facilitar la obturación de los microporos de la arcilla.

iii) **Prevención y corrección de problemas por Interacciones Físicas con el Fluido de Perforación**

Las interacciones físicas también pueden causar la inestabilidad del pozo. Éstas incluyen la erosión, la cual causa el ensanchamiento del pozo, la humectación a lo largo de fracturas preexistentes y la invasión de fluido que causa la transmisión de la presión. Un pozo es más estable cuando hay suficiente presión hidrostática para que el sobrebalance siga actuando exactamente sobre el frente del pozo y cuando el esfuerzo máximo sobre el pozo es inferior a la resistencia de la formación. Por este motivo, es importante mantener un pozo de calibre uniforme para minimizar las pérdidas de filtrado dentro de las formaciones permeables. También es importante usar agentes de obturación o de taponamiento para impedir que la invasión de fluido y la transmisión de presión ocurran radialmente hacia afuera del pozo.

- **Erosión:** La erosión es causada por la turbulencia del fluido en las formaciones blandas. Las formaciones blandas que se erosionan fácilmente son las areniscas no consolidadas, las tizas blandas, y las arcillas más blandas. El flujo turbulento puede causar la erosión en las formaciones más blandas. Además la alta velocidad de corte de la tobera constituye la causa principal de la erosión causada por el fluido. Las altas velocidades de corte de la tobera son usadas para maximizar la velocidad de penetración, y esta característica puede ser más importante que la erosión resultante del pozo. La cantidad de erosión que se producirá depende de la resistencia de la roca; algunas formaciones no serán afectadas. Al perforar arenas no consolidadas, puede que sea necesario usar otras técnicas para limitar la erosión. En estas arenas, los lodos viscosos con características de

disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte y altos contenidos de bentonita (para formar un buen enjarre).

- **Humectación, invasión de fluido y transmisión de presión:** La humectación a lo largo de las micro fracturas preexistentes de la arcilla, la invasión de fluido y la compensación de la presión de sobre balance son factores que comprometen la estabilidad del pozo. Para los lodos base agua, el uso de un aditivo insoluble para limitar la filtración a través del enjarre en las areniscas y dentro de los microporos de las arcillas humectadas por agua ofrece una ventaja. El uso del filtrado bajo obtenido con un enjarre de buena calidad y polímeros combinados con un aditivo de obturación de poros, reducirá la invasión de fluido y limitará la transmisión de presión.

9. CONCLUSIONES

1. Al analizar los valores de las pruebas fisicoquímicas y reológicas realizadas a los lodos de perforación del pozo geotérmico TR-19 de Berlín, Usulután pudo observarse que la presencia de arcillas naturales en la etapa de 17 ½ pulgadas era mayor comparada con las demás etapas de perforación.
2. En la etapa 17 ½ pulgadas el comportamiento reológico mostrado por el fluido de perforación refleja un aumento en sus propiedades: viscosidad de Marsh, esfuerzo cortante y punto de gel; aumento se percibe también con la prueba de azul de metileno.
3. Debido a que generalmente en la etapa 17 ½ pulgadas de la perforación, la formación encontrada corresponde a escorias y lavas intracaldérica de Berlín, que son rocas ígneas que bajo condiciones de intemperismo sufren alteraciones hidrotermales, convirtiéndose con el paso del tiempo en arcillas; puede inferirse que al observarse un incremento en el total de arcillas contenidas en el lodo de perforación y el aumento en sus propiedades reológicas, está ocurriendo una adición de arcillas naturales de la formación hacia el lodo de perforación.
4. Con el análisis de los modelos reológicos se concluye que el modelo de Bingham es deficiente para velocidades de corte menores a 300 RPM y, para velocidades cercanas a cero no podemos realizar el análisis con el modelo de ley de potencias pues no establece un esfuerzo finito de corte; sino que corresponde a un corte de cero lo cual no se comporta como un lodo de perforación real.

5. Comparando los modelos reológicos se comprobó que la Ley Exponencial es la que mejor se adapta al comportamiento real de un lodo base agua, pues al realizarse la interpretación general a partir del reograma de todas las semanas durante la perforación del pozo TR19, la tendencia de la ley exponencial es la que mejor se aproxima a la tendencia experimental, por lo tanto, las ecuaciones matemáticas correspondientes a este modelo son las utilizadas para el cálculo de los esfuerzo de corte correspondientes

6. Con la prueba de azul de metileno se pudo observar el contenido total de arcillas presentes en el fluido de perforación este incrementa a partir del séptimo día llegando a un valor máximo de $71.25 \frac{kg}{m^3}$ que corresponde al día 15 esto relacionando las fechas de análisis con la perforación, por lo tanto, se concluye que estos corresponden a la fase 17 ½ pulgadas, fase en la cual la presencia de arcillas naturales es mayor.

7. Las arcillas de formación cuando se incorporan al lodo aumentan la concentración de arcilla en el lodo de perforación lo que ocasiona una mayor plasticidad, mayor resistencia gel y disminución en el filtrado del lodo.

10. RECOMENDACIONES

1. Una medida para contrarrestar el efecto de aumento de las arcillas en el fluido de perforación es a través de la disminución o suspensión de la cantidad de Bentonita que se adiciona al lodo de perforación.
2. Para realizar un análisis más profundo del tipo de arcillas naturales existentes; es necesario realizar pruebas de difracción de rayos X pues de esta manera se podrá diferenciar cada tipo de arcilla y la influencia de esta en la formación.
3. Se requiere de diferentes perspectivas que conformen un equipo de trabajo multidisciplinario en las áreas de geoquímica, geología, mecánica de perforación y fluidos de perforación, para así identificar tanto la influencia de las arcillas y establecer una metodología para evitar los estrangulamientos de las herramientas de perforación y a la vez utilizar de mejor manera las propiedades del lodo en base al contenido de arcillas y sus propiedades en la perforación del pozo.
4. Es necesario establecer una metodología para el tratamiento de las formaciones arcillosas; la cual debe contener las etapas principales de evaluación y caracterización sistemática de la formación en estudio, que contempla: La evaluación del campo para un análisis preliminar de estabilidad de agujero; la evaluación de interacciones fluido/arcilla para un análisis de estabilidad de agujero integral, donde se puede establecer la composición del fluido de perforación; así como las propiedades fisicoquímicas y reológicas adecuadas, cuando estemos en presencia de formaciones arcillosas.

11. BIBLIOGRAFIA

1. Baroid. "MANUAL DE FLUIDOS DE PERFORACION", Baroid, a Halliburton Company, Houston, USA 1999.
2. Barrios, Luz A.; DESARROLLO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS EN EL SALVADOR; INGENIERÍA DE RESERVORIOS, Gerencia de Producción LaGeo.
3. Chenari, Jamshide, presentación de "CLAY MINERALOGY"
4. Dickson, Mary H. y Fanelli, Mario. Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia, 2000
5. G.P.A. Estudios y Servicios Petroleros S.R.L, Nota técnica 18: "Arcillas, rocas reservorio y daño de formación".
6. Gutarra Espinoza, Abel. "MATERIALES ABSORBENTES II: ARCILLAS", artículo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
7. Guitierrez G., Xochilt C. "ESTUDIO GEOQUIMICO DE GASES EN TORNO A LA FALLA EL HOYON, BERLIN, USULUTAN" Trabajo de graduación para optar al título de Licenciado en Ciencias Químicas, Universidad de el Salvador, San Salvador, Julio 2008.
8. Hernández Murga, C. B. y Mendoza Alonzo, J. E. "OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FLOCULACION DE LA SILICE, CARACTERIZACION FISICOQUIMICA Y ALTERNATIVAS DE USO DEL SOLIDO OBTENIDO, USANDO COMO MATERIA PRIMA EL AGUA RESIDUAL DEL CAMPO GEOETERMICO DE BERLIN". Trabajo de graduación para optar al título de

Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2000.

9. Llopis T., G. & Rodrigo A.,V., “GUÍA DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA”, Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid: 13,18, 25.
10. Maksaev, Víctor. “APUNTES DE METALOGÉNESIS”, Universidad de Chile, 2001.
11. Mary H. Dickson y Mario Fanelli, “¿QUÉ ES LA GEOTERMIA?”, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia.
12. Medina, A.; Saldivia, J.; Vasquez, C.; Vivenes, M. “ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LOS SISTEMAS DE FLUIDOS DE PERFORACION LIGNOSULFANATOS Y SUS CONTAMINANTES BICARBONATOS-CARBONATOS” Investigación de la Universidad de Oriente Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería de Petróleo. Maturín, Junio 2010.
13. Millán Q., Leandro R. y Rivero D., José A. “DETERMINACION DE UNA CORRELACION PARA EL ESTUDIO DE LAS PERDIDAS DE PRESION DURANTE LA PERFORACION DE POZOS VERTICALES AL UTILIZAR LODOS BASE ACEITE, Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Universidad Central de Venezuela, Diciembre
14. Muñoz, Muñoz, Mancía y Rogriguez-Paez 2007, “CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE ARCILLAS DEL MUNICIPIO DE GUAPI-COSTA PACIFICA CAUCANA-COLOMBIA” Artículo de la Revista Académica de Colombia, Volumen XXXXI, Diciembre 2007.

15. Murray, H.H. "APPLIED CLAY MINERALOGY", primera edición, Indiana, USA, 2007
16. Navarro Fernandez, Jose M., "PLASTICIDAD DE ARCILLAS". Artículo del Departamento de Silicatos del Patronato Juan de la Cierva, de Investigación Técnica. Septiembre- octubre 1962.
17. Ramírez, Juan. "PRESENTACIÓN DE INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA GEOTÉRMICA", Universidad de El Salvador 2011
18. Sierra, J.L & G. Pedro ,ENERGÍA GEOTÉRMICA, documento publicado 1998

12. GLOSARIO

ADITIVO DE LODO: Todo material que se agregue a un fluido de perforación para un propósito en particular.

ALTERACIÓN

HIDROTÉRMAL: Cambios mineralógicos, texturales y químicos de una roca producidas ante la presencia o circulación de soluciones hidrotermales.

ANÁLISIS FLUIDO

DE PERFORACIÓN: Examen y ensayo del fluido de perforación para determinar sus propiedades físicas y químicas y su condición.

API: Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute)

ARCILLA (LUTITA): Roca sedimentaria de grano fino compuesta por limo y lodo consolidados. Constituye la roca sedimentaria que aparece con mayor frecuencia.

ARCILLA PLÁSTICA: Toda formación relativamente pegajosa, como la arcilla, entre durante la perforación.

ARCILLA: Tierra plástica, blanda, de colores variados, por lo general es un hidrosilicato de alúmina, que se forma por la descomposición del feldespato y otros silicatos de aluminio. Los minerales de arcilla son esencialmente insolubles en agua, pero bajo condiciones tales como hidratación, fuerzas de corte como la pulverización,

efectos de la velocidad, se dispersan en partículas extremadamente pequeñas, que van desde tamaños inferiores a 1 micrón hasta 100 micrones.

ARCILLAS

NATURALES: Naturales, en contraposición a las comerciales, son aquellas que se encuentran al perforar varias formaciones. El rendimiento de estas arcillas es muy variable y pueden ser incorporadas a discreción en el sistema de lodo.

ARCOS MAGMÁTICOS: Regiones caracterizadas por su forma arqueada y por su sismicidad y volcanismo intensivos.

BENTONITA: Arcilla plástica, coloidal, constituida en su mayor parte por el mineral montmorilonita de sodio (un silicato de aluminio hidratado) que se expande cuando se humedece. Debido a sus propiedades de formación de gel, la bentonita es un componente importante de los lodos de perforación. Para su uso en fluidos de perforación.

BOP: Iniciales de blowout preventer, preventor de reventones. (BOP).

CASING: Tubería de acero que se coloca en un pozo de petróleo o de gas a medida que avanza la perforación para evitar que las paredes del pozo se derrumben durante la perforación y para extraer petróleo si el pozo resulta ser productivo.

CALIPER: Herramienta utilizada en la perforación de pozos, es de gran importancia, ya que por medio de este se puede determinar si el pozo se encuentra libre o posee cierto nivel de obstrucción.

DORSALES

OCEANICAS: Son cordilleras submarinas que se extienden a lo largo de miles de kilómetros. Surgen en las zonas de contacto submarinas de dos placas. En esas líneas de encuentro coinciden, en el interior de la corteza oceánica, corrientes de material basáltico que afloran formando grandes cordilleras.

EMBUDO MARSH: Instrumento que se utiliza para determinar la viscosidad de embudo Marsh. El embudo Marsh es un recipiente con un orificio fijo en el fondo.

ERUPCIÓN

PLINIANA: Asociada a magmas de composición félsica (ácidos). Se caracteriza por su alto grado de explosividad, con manifestaciones muy violentas en las cuales se expulsan grandes volúmenes de gas volcánico, fragmentos y cenizas.

ESFUERZO

CORTANTE: Esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico. Este tipo de esfuerzo formado por tensiones paralelas está directamente asociado a la tensión cortante

FOSA TECTÓNICA: Depresión del terreno por efecto de fuerzas internas, de la tierra.

FALLA

TRANSCURRENTE: Se deben a la acción de movimientos horizontales. Estas fallas destacan menos topográficamente, aunque a veces, cuando se producen a escalas casi continentales, pueden presentar un accidente largo y angosto, en forma de trinchera, con vertientes paralelas escarpadas, llamado *rift* o *valle de fractura*.

FLUIDO DILATANTE: Un fluido dilatante o fluido plástico invertido está compuesto generalmente por una alta concentración de sólidos dispersos. Exhibe una curva de consistencia no lineal que pasa a través del origen. La viscosidad aparente aumenta instantáneamente con el aumento de la velocidad de corte.

FLUIDO NEWTONIANO: Es el más básico y simple de los fluidos, en relación a la viscosidad en base a la cual la fuerza de corte resulta directamente proporcional a la velocidad de corte. Estos fluidos comenzarán a moverse de inmediato al aplicar una presión o fuerza superior a cero.

FLUIDO PLÁSTICO: Fluido complejo, no Newtoniano, en el que la fuerza de corte no es proporcional a la velocidad de corte. Se requiere una presión exacta para comenzar mover el fluido y mantenerlo en movimiento.

FLUIDO

SEUDOPLÁSTICO: Un complejo fluido no-Newtoniano que no posee tixotropía. Presión o fuerza superior a cero que provocará el comienzo del flujo de fluido. La aparente viscosidad o consistencia disminuye en forma instantánea, acompañada por una velocidad de corte en aumento, hasta que, en determinado punto, la viscosidad se torna constante.

FLUIDO/LODO

DE PERFORACIÓN: Fluido de circulación que se utiliza en perforación desempeñar una o varias de las funciones que se requieren en una operación de perforación. Una de las funciones es la de impulsar los recortes al exterior del pozo y a la superficie. Si bien el fluido de perforación más común está constituido por una mezcla de arcilla, agua, y otros aditivos químicos, también se pueden perforar pozos utilizando aire, gas o agua como fluidos de perforación.

GRABEN O

FOSA TECTÓNICA: Bloque hundido y delimitado por fallas a resultas de un movimiento orogénico.

IGNIMBRITA: Es una roca ígnea y depósito volcánico con grado de cristalización holovítrea formado por flujos piroclásticos de más de 1Km^3 .

MONTMORILLONITA: Material arcilloso utilizado habitualmente como aditivo para lodos de perforación. La montmorillonita de sodio

es el elemento constitutivo principal de la bentonita. La estructura de la montmorillonita tiene una forma característica, una placa delgada de ancho y largo indefinidos, del espesor de la molécula. El espesor de la molécula es de tres capas. En la superficie hay iones adheridos que son reemplazables. La montmorillonita de calcio es el elemento constitutivo principal de las arcillas de bajo rendimiento.

MUESTRA DE LODO: Fluido de perforación con propiedades que permiten realizar muestras adecuadas.

MUESTRAS

DE RECORTES: Recortes de muestras para información geológica, provenientes del fluido de perforación a medida que sale del pozo. Se lavan, se secan y se les coloca una etiqueta indicando la profundidad.

PLASTICIDAD: Propiedad que poseen algunos sólidos, en especial las arcillas y lechadas de arcilla, de cambiar de forma o fluir cuando se los somete a presión, sin formar planos cortados o fracturas.

REOGRAMA: Es una notación gráfica para describir conjuntos de relaciones de ecuaciones lineales.

VISCOSIDAD: Esfuerzo cortante de un fluido dividido por el correspondiente índice de corte.

PUNTO CEDENTE: La fuerza requerida para iniciar el flujo; el valor calculado del esfuerzo cortante del fluido cuando el reograma es extrapolado al eje de las Y.

VISCOSIDAD: Oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales.

ZONA DE SUBDUCCIÓN: Zona larga y estrecha donde una placa litosférica desciende por debajo de otra. La fricción producida en esta zona lleva al derretimiento del manto, que a su vez, asciende a través de la corteza continental creando volcanes.

13. ANEXOS

ANEXO 1:
ENSAYOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO

ENSAYO DE DENSIDAD

El proceso de medición de la densidad consiste en:

- 1) Quitar la tapa de la copa y proceder al llenado de la misma con la muestra de lodo.
- 2) Se coloca la balanza sobre la base ajustando el riel de soporte sobre el punto de apoyo.
- 3) Se procede a deslizar la pesa corrediza a través del riel, hasta que el indicador de burbuja se estabiliza indicando así la densidad del lodo.

ENSAYO DE MEDIDA DE PH:

Procedimiento:

1. Recoger filtrado de una muestra de fluido usando el método de filtrado API.
2. Sumergir el extremo de una tira pH en el filtrado durante 5 segundos.
3. Comparar el cambio de color de la tira con la tabla de colores en la caja de tiras pH.

Si ...	Luego...
El color no está en la carta de colores y no puede hacer coincidir,	Repetir los Pasos 1 - 4 usando una tira con rango de pH más próxima a la escala de pH prevista.

4. Leer y registrar el valor pH.

ENSAYO PRUEBA DE AZUL DE METILENO (MBT)

Procedimiento:

- 1) Recoger una muestra de fluido.
- 2) Agregar agua destilada en el frasco Erlenmeyer.
- 3) Transferir muestra de fluido al frasco Erlenmeyer
- 4) Agregar a la mezcla la solución de peróxido de hidrógeno y la solución de ácido sulfúrico.
- 5) Colocar el frasco sobre el calentador hasta que hierva la mezcla, y hervir la mezcla a fuego lento.
- 6) Retirar el frasco del calentador y diluir la mezcla con agua destilada. Dejar enfriar la mezcla.
- 7) Agregar a la mezcla de solución de azul de metileno.



Figura 6 Pasos de 1-9 del ensayo de azul de metileno (pruebas realizadas en el laboratorio de la Perforadora Santa Barbara, Berlín Usulután)

- 8) Agitar el contenido del frasco Erlenmeyer durante unos 20 segundos.
- 9) Transferir con la varilla agitadora una gota de la mezcla al papel de filtro.

Si la gota...	Luego...
Forma un halo azul	Ir a paso 11
No forma un halo azul	Repetirlos pasos 8-10

10) Agitar la mezcla

11) Transferir con la varilla agitadora una gota de la mezcla al papel de filtro.

Si la gota...	Luego...
Forma un halo azul	Este es el punto final. Ir al paso 13
No forma un halo azul	Repetirlos pasos 8-12

12) Registrar el volumen de solución de azul de metileno usada para llegar al punto final.

13) Calcular el CEC del azul de metileno.

$$CEC, \frac{meq}{mL} \text{ del fluido} = \frac{mL \text{ de solución de azul de metileno}}{mL \text{ de muestra del fluido}}$$

14) Calcular el contenido equivalente de bentonita.

ENSAYO DE PROPIEDADES REOLÓGICAS: EMBUDO DE MARSH

Procedimiento:

- 1) Recoger una muestra de fluido.
- 2) Tapar con un dedo el orificio del embudo y echar la muestra de fluido a través del tamiz hasta que el nivel de la muestra llegue a la cara inferior del tamiz.



Figura 7 La muestra de lodo es de la presa de succión y esta es vertida en el embudo de Marsh (pruebas realizadas en el laboratorio de la Perforadora Santa Barbara, Berlín Usulután)

- 3) Retirar el dedo que tapa el orificio del embudo y simultáneamente poner a contar el cronómetro.
- 4) Registrar como viscosidad del embudo de Marsh el tiempo que tarda para que 1 cuarto de galón de la muestra salga por el embudo.

ENSAYO PROPIEDADES REOLÓGICAS: VISCOSÍMETRO ROTATORIO.

Procedimiento

- 1) Recoger una muestra de fluido.
- 2) Colocar la muestra en una taza de viscosímetro termostáticamente controlada.
- 3) Calentar la muestra a la temperatura seleccionada.
- 4) Hacer girar la manga del viscosímetro a 600 rpm hasta obtener una lectura estable en el dial.



Figura 8 Proceso para determinar la viscosidad utilizando el reómetro de Fann (pruebas realizadas en el laboratorio de la Perforadora Santa Barbara, Berlín Usulután)

- 5) Hacer girar la manga del viscosímetro a 300rpm hasta obtener una lectura estable en el dial.
- 6) Revolver la muestra a 600 rpm, y después dejar reposar el lodo durante 10 segundos.
- 7) Hacer girar la manga del viscosímetro a 3 rpm hasta obtener la máxima lectura en el dial.
- 8) Registrar la máxima lectura del dial obtenida como resistencia del gel de 10-segundos, lbf/100 pies².
- 9) Revolver nuevamente la muestra durante 10 a 15 segundos a 600 rpm, y después dejar reposarla muestra sin tocar durante 10 minutos.
- 10) Hacer girar la manga del viscosímetro a 3 rpm hasta obtener la máxima lectura del dial.
- 11) Registrar la máxima lectura del dial obtenida como resistencia del gel de 10-minutos, lbf/100pies².

ENSAYO DE LA PRUEBA DE FILTRADO API

Procedimiento:

1. Recoger una muestra de fluido.
2. Echar la muestra en la celda
3. Meter la celda dentro del marco; colocar y ajustar la tapa sobre la celda.
4. Colocar un cilindro graduado seco debajo del tubo de drenaje.



Figura 9 Se vierte la muestra de lodo en la celda para realizar el filtrado (pruebas realizadas en el laboratorio de la Perforadora Santa Barbara, Berlín Usulután)

5. Mantener la presión a 100 ± 5 psi (690 ± 35 kPa) durante 30 minutos.
6. Cerrar el flujo con el regulador de presión y abrir con cuidado la válvula de alivio.
7. Registrar el volumen de filtrado en el cilindro graduado con precisión del más próximo mL.

Nota: Si se usa un filtro prensa de media área, multiplicar por 2 el volumen del filtrado.

8. Aflojar la presión, verificar que ha sido descargada toda la presión, y retirar la celda del marco.



Figura 10 Se abre las válvulas de alivio y se regula la presión hasta 100 psi (pruebas realizadas en el laboratorio de la Perforadora Santa Barbara, Berlín Usulután)

9. Desarmar la celda y descartar el lodo.
10. Dejar la costra de lodo sobre el papel y lavar ligeramente con el fluido base para quitar todo exceso de lodo.

Medir y registrar el espesor de la costra de lodo con aproximación de 1/32 pulg. (1.0 mm).

ENSAYO DE CONTENIDO DE ARENA

Procedimiento:

1. Recoger una muestra de fluido.
2. Echar fluido en el tubo de contenido de arena hasta la marca del lodo.
3. Tapar con un dedo la abertura del tubo de contenido de arena y sacudir fuertemente el tubo.
4. Volcar el contenido del tubo de contenido de arena sobre el tamiz malla 200. Desechar el fluido que pasa a través del tamiz.



Figura 11 Procedimiento de prueba contenido de arena (pasos del 1-5) (pruebas realizadas en el laboratorio de la Perforadora Santa Barbara, Berlín Usulután)

5. Lavar cuidadosamente la arena del tamiz con fluido base para quitar todo lodo remanente.
6. Colocar la parte ancha del embudo por encima del tamiz e invertir lentamente el tamiz y el embudo.
7. Rociar el tamiz con fluido base de modo que la arena del tamiz caiga dentro del tubo.
8. Colocar el tubo en posición completamente vertical y dejar que se asiente la arena.
9. Leer el porcentaje de arena en el tubo de contenido de arena y registrar el contenido de arena como porcentaje en volumen.